



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ УПРАВЛІННЯ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ: РОЗРАХУНКОВА РОБОТА**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю спеціальності 151 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»,  
за освітньою програмою підготовки (спеціалізацією)  
«Комп'ютерно-інтегровані сталі хімічні виробництва»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Технологічні об'єкти управління: Теоретичні основи функціонування об'єктів управління: Розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.П.Швед, Д.М.Швед, А.Р. Степанюк, – Електронні текстові данні (1 файл: 4,74 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 146с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 7 від 27.02.2020 р.)  
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету  
(протокол № 11 від 27.11.2019 р.)  
Електронне мережне навчальне видання*

## **ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ УПРАВЛІННЯ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ: РОЗРАХУНКОА РОБОТА**

Укладачі: *Швед Микола Петрович*, канд. наук, доц.  
*Швед Дмитро Миколайович*, канд. наук, пров. інж.  
*Степанюк Андрій Романович*, канд. наук, доц.

Відповідальний редактор *Корнієнко Я.М.* докт. техн. наук, професор

Рецензент: *Сокольський О.Л.*, канд.тех. наук, доц.

У навчальному посібнику викладено матеріали, необхідні для виконання розрахункової роботи: мета та завдання роботи, завдання, склад, обсяг і структура розрахункової роботи, вказівки до виконання розділів розрахункової роботи, рекомендації до виконання пояснювальної записки, рекомендації щодо порядку захисту розрахункової роботи, приклади розрахунків, зразки титульних аркушів та перелік посилань.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

## Зміст

ВСТУП.....	4
1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ .....	5
2 ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВУ РОБОТУ .....	6
3 СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ .....	7
4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ.....	8
5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ.....	10
5.1 ВИМОГИ ДО ФОРМАТУВАННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ ...	10
5.2 ВИКЛАД ТЕКСТУ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ.....	12
6 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПОРЯДКУ ЗАХИСТУ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ.....	23
7 СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	26
ДОДАТОК А ТИТУЛЬНИЙ АРКУШ.....	27
ДОДАТОК Б ЗАВДАННЯ .....	28
ДОДАТОК В ЗМІСТ .....	30
ДОДАТОК Г АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ НА ТЕМУ «ПІДІГРІВАЧ ГІДРОКСИДУ НАТРІЯ» .....	32
ДОДАТОК Д АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ НА ТЕМУ «РОЗРАХУНОК ВАКУУМ – ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ » .....	73
ДОДАТОК Е АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ НА ТЕМУ «БАРАБАННА СУШАРКА ДЛЯ СУШІННЯ НІТРАТУ АМОНІЮ» .....	112

## **ВСТУП**

Шлях до впровадження у виробництво наукових розробок лежить через розрахунки та створення конструкторської документації. Розробка такої документації це творчий процес, який потребує від проектувальника не тільки глибоких знань дисциплін, але й уміння використовувати їх при проектуванні та в умовах виробництва. Від якості конструкторської документації, як правило, залежить кінцевий результат наукової розробки, доля нових машин і апаратів.

Навчальний посібник складено у відповідності до ГОСТ 2.105-95.

## **1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ**

Метою розрахункової роботи є набуття практичних умінь при виконанні студентами технічної документації з дисципліни «Технологічні об'єкти і процеси галузі-1».

Завданнями розрахункової роботи є:

- привести класифікацію та опис відповідного теплообмінного обладнання;
- обґрунтувати вибір типу апарата для забезпечення процесу;
- провести порівняння апарата (машини) з аналогами;
- обґрунтувати вибір матеріалів для виготовлення апарата (машини);
- скласти матеріальний та тепловий баланси апарата (машини);
- визначити основні геометричні розміри апарата (машини);
- виконати схематичне зображення апарата (машини) та його елементи;
- презентувати виконану роботу.

## **2 ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВУ РОБОТУ**

Завдання видається кожному студенту особисто протягом перших двох тижнів навчання. Перелік завдань розрахункових робіт наведено в робочій навчальній програмі дисципліни.

Текст завдання підписується студентом, що буде виконувати розрахункову роботу, керівником та затверджується на засіданні кафедри МАХНВ.

Зразок завдання розміщено у Додатку А.

### **З СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ**

Розрахункова робота складається з розділів, перелік яких визначається керівником у завданні для виконання розрахункової роботи (Додаток А). Орієнтовний обсяг розрахункової роботи 15...25 аркушів формату А4.

#### **4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ**

При виконанні розділів, необхідно звернути увагу на:

Розділ «Вступ».

У вступі коротко надається інформація про актуальність обладнання теплового процесу, що буде розраховуватись. Далі у відповідності до змісту роботи ставляться мета та задачі розробки.

Приблизний обсяг розділу – 1 аркуш.

**Розділ «1 Класифікація та опис відповідного теплотехнічного обладнання»**

У розділі наводиться класифікація та опис конструкцій відповідного теплотехнічного обладнання.

Приблизний обсяг розділу – 5...6 аркушів.

**Розділ «2 Вибір типу апарата та обґрунтування його конструкції»**

У розділі наводиться призначення апарата та вибирається його тип, що забезпечує виконання технологічного процесу, а також наводиться опис основних елементів складових частин апарата і надається його схема .

Приблизний обсяг розділу – 1...2 аркуші.

**Розділ «3 Вибір та характеристика теплоносіїв і матеріалів апарата»**

Наводиться характеристика та обґрунтування вибору теплоносіїв, а також вибираються матеріали для основних деталей апарата з урахуванням



агресивності середовищ та виконання умов міцності. Вказуються джерела та їх бібліографічні данні.

Приблизний обсяг розділу – 1...2 аркуші.

#### **Розділ «4 Технічна характеристика»**

Подаються основні технічні вимоги до апарата, що буде розраховуватись.

Приблизний обсяг розділу – 1 аркуш.

#### **Розділ «5 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції апарата (машини)»**

##### **Підрозділ «5.1 Параметричний розрахунок апарата (машини)»**

Виконується проектний або перевірочний розрахунок апарата та визначаються його основні геометричні розміри .

Приблизний обсяг розділу – 10...20 аркушів.

#### **Розділ «Висновки»**

У висновку перераховуються всі роботи, що були виконані у відповідності до змісту роботи, та приводиться технічна характеристика апарата, який розраховували. Вказуються всі авторські модифікації та модернізації.

Приблизний обсяг розділу – 1 аркуш.

#### **Розділ «Перелік посилань»**

Посилання на використані джерела приводяться в тій послідовності в якій вони згадуються в тексті.

## 5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

### 5.1 ВИМОГИ ДО ФОРМАТУВАННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Записка оформляється текстом шрифтом «*Times New Roman*» розміром 14 кегль з 1,5-им міжрядковим інтервалом. Відступи у тексті зліва та справа рядків і інтервали перед та після строчок – відсутні.

Вирівнювання тексту **по ширині**.

Нумерація сторінок повинна бути **наскрізна** для всієї записки, включаючи додатки.

Відступ першого рядка (абзац) 1,5 см.

Використовувати підкреслення **недопустимо**.

Напівжирне форматування тексту допускається лише в назвах розділів, підрозділів, пунктів та підпунктів.

Поля сторінки – 15мм зверху, 30мм знизу, 25мм зліва та 10мм справа, що відповідає відстані від рамки сторінки – 10мм зверху, 10мм знизу, 5мм зліва та 5мм справа.

Кожна сторінка має рамку 15мм, за виключенням титульного аркуша (додаток А), завдання (додаток Б), які виконуються на листах без рамки та першої сторінки змісту, що є першим листом пояснювальної записки з рамкою та має рамку 40мм (додаток В). Зміст, розташування і розміри граф основних написів рамок має відповідати нормам встановленим ГОСТ 2.104-68.

Текст пояснювальної записки розділяють на розділи і підрозділи, відповідно до змісту та при необхідності на пункти та підпункти. До змісту вносять лише розділи та підрозділи, а пункти, підпункти **НЕ ВНОСЯТЬСЯ** (додаток В).

Розділи повинні мати порядкові номери в межах усього документа (частини), позначені арабськими цифрами. Підрозділи повинні мати подвійну нумерацію – перша цифра відповідає номеру розділу в якому вони

знаходяться, а друга – порядковому номеру підрозділу в межах розділу. Аналогічна нумерація пунктів – потрібна, та підпунктів, де може бути вже чотири цифри. Кожна цифра відділяється крапкою, а після останньої цифри перед найменуванням крапка **НЕ СТАВИТЬСЯ**. Наприкінці номера розділу, підрозділу, пункту чи підпункту крапка **НЕ СТАВИТЬСЯ**.

В середині пунктів, підпунктів можуть знаходитись перерахування, правила оформлення яких наводяться в ГОСТ 2.105-95 в п. 4.1.7.

Найменування розділів повинні бути короткими (наведені в змісті, додаток Б). Найменування розділів і підрозділів записують у вигляді заголовків з абзацу прописними літерами (окрім першої великої літери) **напівжирним** форматом літер. Вирівнювання тексту при цьому «**по ширині**». Використання курсивного форматування, підкреслення та переноси слів у найменуваннях **НЕ ДОПУСКАЄТЬСЯ**. Крапка наприкінці **НЕ СТАВИТЬСЯ**. Якщо найменування складається з двох речень, то їх розділяють крапкою.

Розташовувати назву розділу, підрозділу та тексту на різних сторінках **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ**.

Між назвою розділу або підрозділу та текстом має бути вільний рядок. Якщо після назви розділу відразу іде назва підрозділу, то між ними так само має бути вільний рядок.

Приклад оформлення найменування розділу та підрозділу наведений в прикладі 5.1.

#### Приклад 5.1

### **1 Призначення та область використання установки**

#### **1.1 Опис технологічного процесу**

Технологічна схема установки зображена ... .

Кожен розділ пояснювальної записки починають з нового листа (сторінки). Підрозділи ідуть один за одним в межах розділу на відстані в один вільний рядок.

## 5.2 ВИКЛАД ТЕКСТУ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Текст викладається у відповідності до форматування та структури наведених раніше. Повне найменування виробу на титульному листі, в основному написі і при першому згадуванні в тексті документа повинне бути однаковим з найменуванням його в основному конструкторському документі – специфікації складального креслення апарата. Найменування, що наводяться в тексті пояснювальної записки і на ілюстраціях, повинні бути однаковими.

Цифри, літери кирилиці, грецькі літери пишуться **БЕЗ курсиву**. Латинські літери пишуться курсивом, у тому числі назви критеріїв [характеристичні числа] – *Re*, *Pr*, *Nu* (ДСТУ 3651.2-97) та інше, винятком є назви усталених математичних функцій та позначень (наприклад: *cos*, *sin*, *max*, *min*, *log*). Ці вимоги стосуються як самого позначення так і верхніх та нижніх індексів (при використанні на приклад в якості позначення латинської літери – вона пишеться курсивом, а індекс написаний кирилицею – без курсиву: [*Q*<sub>роб</sub>]).

При необхідності внесення виправлень в текст пояснювальної записки, допускається виправляти білою замазкою (коректором) та написання поверх неї правильні написи чорним чорнилом.

**ЗАБОРОНЕНО** в тексті (окрім формул та таблиць) писати «-» – замітини словом «мінус»; «Ø» – замітини словом «діаметр»; писати без цифр символи «>», «<», «=», «±», «≠», «≡», «≈», «№», «%».

Перелік допустимих скорочень наведено в ГОСТ 2.316.

Стандартизована система одиниць наведена в ГОСТ 8.417, що відповідає системі одиниць СІ.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ** разом із написаними в системі одиниць СІ параметрами, вказувати їх значення в одиницях, що раніше використовувались.

**ЗАБОРОНЕНО** розривати числа з розмірностями.

### **5.3.1 Оформлення розрахунків**

Всі розрахунки ведуться в стандартизованій системі вимірювань ГОСТ 8.417, виключеннями можуть бути окремі емпіричні формули виведені та одержані для іншої системи вимірювань, при цьому відповідь одержану не в стандартизованій системі необхідно перевести.

При виконанні розрахунків, числа округляються до четвертої значущої цифри, що в повній мірі достатньо для точного розрахунку (наприклад: 0,5512; або 159,6).

**В кожному підрозділі розрахунок складається за такою схемою (Приклад 5.2):**

1. Мета розрахунку з вказівкою, які параметри та величини мають бути визначені в кінці розрахунку.
2. Розрахункова схема або ескіз (у довільному масштабі) з позначенням вхідних параметрів та величин, що мають розрахуватись.
3. Вхідні данні, частина з яких може бути результатами попередніх розрахунків, при цьому однакові позначення тих самих величин не обов'язкові, але бажані.
4. Посилання на методику розрахунку – джерело звідки взята методика розрахунку.
5. Безпосередньо сам розрахунок.
6. Висновки, відповідно до мети.

## Приклад 5.2.

### 5.3 Розрахунок гідравлічного опору конденсатора

Метою розрахунку є визначення гідравлічного опору трубного простору конденсатора та потужності насосу, оскільки гідравлічний опір при конденсації майже відсутній та долається існуючим компресійним обладнанням установки.

Розрахункова схема гідравлічного розрахунку наведена на рисунку 5.3.

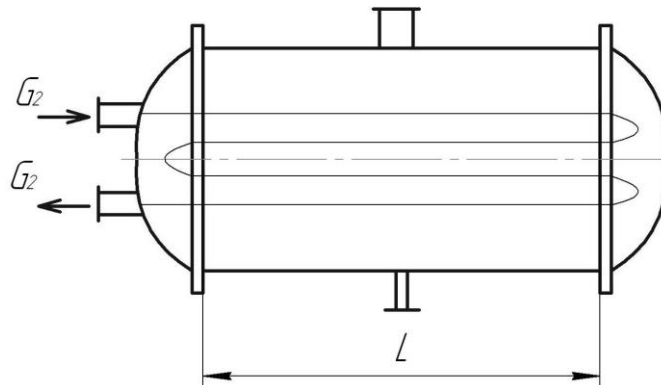


Рисунок 5.3 – Схема гідравлічного розрахунку конденсатора

Вхідні дані:

масова витрата води $G_2$ , кг/с	2,42
швидкість води в трубках $W$ , м/с	0,2145;
швидкість води в штуцерах $W_{шт}$ , м/с	0,201;
густина води $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	981;
критерій Рейнольдса $Re$	10001;
кількість ходів $z$	4;
довжина трубок $L$ , м	2,9;
внутрішній діаметр трубки $d$ , м	0,021.

Розрахунок здійснюємо за методикою, викладеною в [7, ст. 86-94].

Коефіцієнт гідравлічного опору для шорстких труб при відношенні еквівалентного діаметра до середньої висоти виступів:

$$\varepsilon = \frac{d}{e} = \frac{0,021}{0,2} = 0,105,$$

тоді

$$\lambda = \left( \frac{1}{-2 \lg \left[ \frac{\varepsilon}{3,7} + \left( \frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right]} \right)^2 = \left( \frac{1}{-2 \lg \left[ \frac{0,105}{3,7} + \left( \frac{6,81}{10001} \right)^{0,9} \right]} \right)^2 = 0,1104.$$

*<далі наводиться розрахунок з визначенням всіх необхідних величин>*

Висновок: в результаті проведення гідравлічного розрахунку встановлено гідравлічний опір, що виникає в трубному просторі – 480Па, та потужність, яку необхідно витратити для його подолання – 960Вт.

Приклад оформлення програмного розрахунку наведено в додатку П.

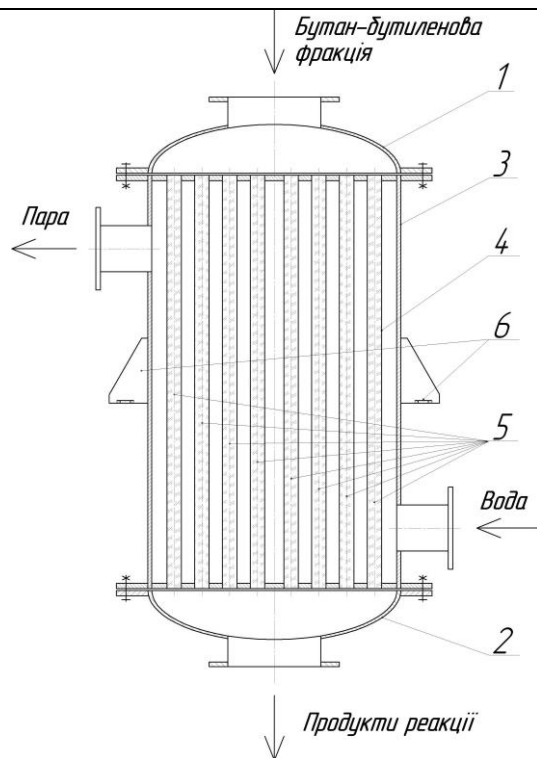
### 5.3.2 Оформлення рисунків

Рисунки з'являються в тексті **лише після** посилання на них. Якщо рисунок не вміщається на тій самій сторінці, що і посилання, то його переносять на наступну сторінку.

Приклад оформлення рисунку (Приклад 5.3).

Приклад 5.3.

У вертикальному кожухотрубному каталітичному полімеризаторі (рисунок 1.2) ББФ потрапляє через штуцер верхньої кришки 1 в труби 4, в яких знаходиться каталізатор (фосфорна кислота нанесена на кізельгур), полімеризується та вже продукти реакції виходять через штуцер нижньої кришки 2.



1 – верхня кришка; 2 – нижня кришка; 3 – корпус; 4 – трубки;  
5 – каталізатор; 6 – опори

Рисунок 1.2 – Реактор полімеризації

*<подальший текст розділу ...>*

Рисунок підписується після самої ілюстрації на тій самій сторінці (розривати **НЕ ДОПУСКАЄТЬСЯ**). Підпис складається із слова «Рисунок», нумерації та назви.

Рисунок має подвійну нумерацію, перша цифра якої відповідає номеру розділу в якому розміщено рисунок, а друга – порядковому номеру рисунка в межах розділу. Після першої цифри ставиться крапка, після другої ставиться знак «—», потім з великої літери лаконічна назва рисунку. Після назви точка **НЕ СТАВИТЬСЯ**.

Якщо на рисунку проставлені позиції чи позначення потоків, то після ілюстрації до підпису рисунку обов’язково має бути розшифрування позицій та потоків.

Ілюстрація та текст вирівнюється «по центру».



### 5.3.3 Оформлення посилань на джерело літератури

При використанні інформації з різноманітних друкованих джерел, чи веб-ресурсів має з'являтися посилання на джерело в тексті та в «Переліку посилань». Після тексту, де згадується використана інформація, в квадратних дужках вказується порядковий номер цього джерела в «Переліку посилань» та через кому номери сторінок, номер таблиці чи рисунку в цьому джерелі де знаходиться використана інформація.

Приклад оформлення переліку посилань (Приклад 5.4).

Приклад 5.4.

<p>&lt; Текст ...&gt;... При цьому об'ємна продуктивність визначається з графіка [7, табл. 3.28]. &lt; Текст ...&gt;</p> <p>&lt; Текст ...&gt;</p> <p><b>Перелік посилань</b></p> <p>&lt; Текст ...&gt;</p> <p>7. К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. Примеры и задачи по курсу процессов химической технологии. Учебное пособие для вузов/Под ред. Чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с., ил.</p> <p>&lt; Текст ...&gt;</p>
--

В прикладі 5.4 проілюстровано посилання на таблицю 3.28 джерела 7. Якщо ж є потреба послатись в цілому на джерело (якщо це є веб-ресурс без розбиття на сторінки, таблиці, рисунки; чи наприклад при визначенні різних теплофізичних властивостей речовин доцільніше послатись повністю на джерело, а не окремо на кожну сторінку, таблицю, рисунок), то в квадратних дужках вказують лише порядковий номер джерела літератури.

Нумерація джерел літератури в «Переліку посилань» з'являється у **хронологічному порядку** відповідно до появи посилання на джерело в тексті

пояснювальної записки. Джерела, що використовувались, але на які не можливо зробити конкретні посилання в тексті (наприклад посилання на методичні вказівки по оформленню магістерської дисертації та інше) вказуються вкінці «Переліку посилань».

#### 5.3.4 Оформлення таблиць

Таблиці як і рисунки з'являються в тексті **лише після** посилання на них. Таблиця підписується зверху. Підпис складається із слова «Таблиця», нумерації та назви. Таблиці мають подвійну нумерацію, перша цифра якої відповідає номеру розділу в якому розміщено таблицю, а друга – порядковому номеру таблиці в межах розділу. Після першої цифри ставиться крапка, після другої ставиться «–», потім з великої літери лаконічна назва таблиці. Після назви точка **НЕ СТАВИТЬСЯ**.

Якщо таблиця повністю не вміщається на тій самій сторінці, що і посилання, то її розбивають на дві частини, перша на тій самій сторінці з повною назвою, друга частина на початку наступної сторінки з назвою, що складається із слів «Продовження таблиці» та номеру таблиці після них.

Текст в назві таблиці вирівнюється по ширині з абзацом як і в тексті.

Графу «номер по порядку» в таблицях створювати **НЕ ДОПУСКАЄТЬСЯ**.

Оформлення таблиці з розривом представлено у Прикладі 5.5.

### Приклад 5.5.

Текст... Перерахунок зведемо до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – До визначення щільності теплового потоку

$\theta_2 = \Delta T_{\text{ср}} - \theta_1, \text{ K}$	$q_1 = 1581 \cdot \theta_1^{0,75}, \text{ W/m}^2$	$q_2 = \frac{\theta_2}{10^{-3}(0,3878 + 2,327\theta_2^{-0,1})}, \text{ W/m}^2$	похибка
1	2	3	4
3,97	1581	1644	3,98%

<кінець сторінки>

...

<нова сторінка>

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4
3,92	1640	1622	1,11

Текст...

### 5.3.5 Оформлення формул

В тексті магістерської дисертації перед позначенням параметру **ОБОВ'ЯЗКОВ** подається його роз'яснення (наприклад: об'ємна витрата першого теплоносія  $V_1$  розраховується з матеріального балансу теплообмінника).

При виконанні розрахунків у магістерській дисертації можливі декілька варіантів використання формул, що відрізняються при оформленні.

1. Коли формула записується **без підстановки** та **без подальшого посилання** на неї.

При цьому після тексту ставиться кома, потім розмірність основної величини, що розраховується за цією формулою (при її наявності), потім

двокрапка та з нового рядку використовуючи вирівнювання по середині записується формула.

Після формули ставиться кома, якщо після неї з нового рядка іде інша формула (Приклад 5.6а). Після формули ставиться кома, якщо з нового рядка розписуються величини, що входять до формули та вперше з'являються в тексті пояснювальної записки (Приклад 5.6б); в цьому випадку після формули з нового рядка з абзацу пишеться «де» та роз'яснюється перша величина, кожна наступна величина пишеться з нового рядка з абзацу. Після формули ставиться крапка, якщо після неї з нового рядка іде продовження тексту (Приклад 5.6в).

Треба зауважити, що **всі величини**, які входять до складу формул, мають роз'яснюватись – має вказуватись їх фізичний зміст, розмірність, посилання на джерело звідки взятє значення параметру (Приклад 5.6б).

#### Приклад 5.6.

<p>а)      &lt; Текст ...&gt; Об'ємна продуктивність розраховується за виразами, м<sup>3</sup>/с:</p> $V = G / \rho ,$ $V = W \frac{\pi D^2}{4}.$ <p>&lt; Текст ...&gt;</p>
<p>б)      &lt; Текст ...&gt; Об'ємна продуктивність розраховується за формулою, м<sup>3</sup>/с:</p> $V = G / \rho ,$ <p>де <math>G = 1,25 \text{ кг/с}</math> – масова продуктивність;  <math>\rho</math> – густина середовища при температурі 278К [7], кг/м<sup>3</sup>.</p>

в) < Текст ...> При цьому умова міцності матиме наступний вигляд:

$$P \leq [P].$$

Виконання цієї умови забезпечить надійність роботи обладнання.

< Текст ...>

2. Коли формула записується **без підстановки**, але з **подальшим посиланням** на неї.

При цьому після тексту ставиться кома, потім розмірність основної величини, що розраховується за цією формулою (при її наявності), потім двокрапка та з нового рядка, використовуючи вирівнювання по середині, записується формула. На тому самому рядку що і формула, але з правого боку в дужках вказується номер формули (Приклад 5.7). Після формули знаки оклику ставляться аналогічно до попереднього варіанту.

Даний спосіб запису формул можливий, коли розписується методика багатоітераційного розрахунку з необхідністю посилань на формули, при складанні програми до розрахунку з подальшим описом її роботи.

Номер формул складається з двох цифр, розділених між собою крапкою. Перша цифра відповідає номеру розділу в якому знаходиться формула, друга – порядковому номеру формули в розділі.

Приклад 5.7.

< Текст ...> Об'ємна продуктивність розраховується за формулою, м<sup>3</sup>/с:

$$V = G / \rho , \quad (5.15)$$

де  $G = 1,25 \text{ кг/с}$  – масова продуктивність;

$\rho = 998 \text{ кг/м}^3$  – густина середовища при температурі 278К [7].

3. У випадку, якщо формула записується з **підстановкою**.

При цьому після тексту ставиться двокрапка та з нового рядка, використовуючи вирівнювання по середині, записується формула з підстановкою та розмірністю біля результату розрахунку (Приклад 5.8).

Розмірність та числове значення розрахованого параметру **НЕ ВІДОКРЕМЛЮЄТЬСЯ** жодними знаками оклику. Після формули знаки оклику ставляться аналогічно до попереднього варіанту.

Приклад 5.8.

< Текст ...> Об'ємна продуктивність розраховується за формулою:

$$V = G / \rho = 1,25 / 1000 \text{ м}^3/\text{с}$$

де  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  – густина середовища при температурі 278K [7].

### 5.3.6 Оформлення додатків

Додатки їх виконують на аркушах формату А4. Додаток нумерують українськими літерами на першому аркуші додатку, за винятком літер Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ї. Кожний додаток розпочинається зі сторінки, де **зверху по середині** вказується слово «Додаток» з вказівкою номера додатку, а на наступному рядку розташовується заголовок додатку з вирівнюванням по середині.

Текст кожного додатку при необхідності розділяють на розділи, підрозділи, які нумеруються окремо по кожному додатку. Додаток може мати свій зміст та перелік посилань. Правила оформлення рисунків та таблиць в додатках ті самі що і в розділах. Номери рисунків та таблиць складається з двох символів – літери, що відповідає номеру додатку, та порядкового номера даного елемента в межах додатку.

Для всієї роботи повинна бути **наскрізна** нумерація аркушів як основного тексту, так і тексту у додатках.

## 6 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПОРЯДКУ ЗАХИСТУ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

За умови виконання розрахункової роботи, студент допускається до захисту.

Оцінюється розрахункова робота за двома складовими:

стартова складова – оцінюється якість виконання розрахункової роботи;

складова захисту – оцінюється якість захисту розрахункової роботи.

**Якість захисту оцінюється за шкалою, встановленою РСО з кредитного модуля.**

Рейтинговий бал за виконання розрахункової роботи перераховується за залежністю:

$$R_{\text{ДНІ}} = \frac{\text{якість виконання графіка роботи з виконання розрахункової роботи} \cdot \text{якість захисту}}{100} \cdot R_{\text{ДР}}.$$

Розмір шкали розрахункової роботи  $R_{\text{РР}} = 100$  балів, складається стартової складової  $R_{\text{С}}$  дорівнює 60 балів та складової захисту  $R_{\text{З}}$  – 40 балів:

$$R = R_{\text{С}} + R_{\text{З}}.$$

1 Стартова складова  $R_{\text{С}}$ :

- своєчасність виконання графіка роботи з виконання розрахункової роботи – 15-9 балів;
- сучасність та обґрунтування прийнятих рішень – 15-6 балів;
- правильність застосування методів аналізу і розрахунку – 15-9 балів;
- якість оформлення, виконання вимог нормативних документів – 15-9 балів.

2. Складова захисту  $R_{\text{З}}$  розрахункової роботи:

- якість доповіді – 10-6 балів;
- ступінь володіння матеріалом – 10-6 балів;
- ступінь обґрунтування прийнятих рішень – 10-6 балів;

– вміння захищати свою думку – 10-6 балів.

Сума складової захисту  $R_3$  визначається згідно з таблицею:

Таблиця переведення рейтингових балів

Бали	Вимоги
10	виставляється, якщо студент демонструє повні й міцні знання навчального матеріалу в заданому обсязі, необхідний рівень умінь і навичок, правильно й обґрунтовано приймає необхідні рішення в різних нестандартних ситуаціях.
9	студент допускає несуттєві неточності в тексті відповідей та додаткових питаннях, але не виявляє труднощів в трансформації умінь у нових умовах.
8	студент допускає несуттєві неточності в тексті відповідей та додаткових питаннях, має труднощі в трансформації умінь у нових умовах.
7	студент засвоїв основний теоретичний матеріал, але допускає неточності в тексті відповідей та додаткових питаннях, що не є перешкодою до подальшого навчання. Уміє використовувати знання для вирішення стандартних завдань.
6	студент засвоїв основний теоретичний матеріал, але допускає суттєві неточності в тексті відповідей та додаткових питаннях, що не є перешкодою до подальшого навчання. Уміє використовувати знання з несуттєвими помилками для вирішення



	стандартних завдань.
0	студент не засвоїв окремих розділів, невірні відповіді на додаткові питання, не здатен застосувати знання на практиці, що робить неможливим його подальше навчання.

Під час захисту студент повинен стисло (до 1...2 хвилини) логічно й аргументовано викласти мету та задачі, що ставились під час виконання розрахункової роботи. Під час доповіді необхідно уникати загальних слів, бездоказових тверджень, тавтології.

Зміст доповіді при захисті розрахункової роботи передбачає:

- задачі та мети дослідження, обґрунтування цілей дослідження;
- викладення отриманих результатів;
- опис принципу роботи розроблюваного апарату;
- викладення повного переліку робіт, виконаних для досягнення поставлених задач на проектування, та результати їх виконання.

Після доповіді викладач задає питання по розрахунковій роботі, для підтвердження розуміння студентом процесу та засад проектування.

Після захисту розрахункова робота здається в архів кафедри МАХНВ на зберігання.

## 7 СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков В.Н. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с. 2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.

3. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1982. – 772 с.

4. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.

5. Кузнецов А.А., Кагерманов С.М., Судаков Е.М. “Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности”. Изд. 2-е , пер. и доп. Л., ”Химия”, 1974 г., 374 с.

6. Лащинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры - Л.: Машиностроение, 1970. – 752 с.

7. Оформление графической документации. Методические указания к выполнению курсовых и дипломных проектов / Сост. В.Н. Марчевский. – 1989.

8. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи для студентів напрямку підготовки: 6.051301 «Хімічна технологія» з дисципліни «Процеси та апарати хімічних виробництв» : [Електронний ресурс]: / НТУУ „КПІ”; уклад. М.П. Швед, Д.М. Швед, Степанюк А.Р. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2012. – 46 с.

**Додаток А Титульний аркуш**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Кафедра машин і апаратів хімічного виробництва**

**Розрахункова робота  
з курсу «Технологічні об'єкти управління: Теоретичні основи  
функціонування об'єктів управління»  
на тему:  
„Барабанна сушарка для сушіння нітрату амонію”**

**Варіант №13**

**Виконав студент групи ХЕ-91 \_\_\_\_\_ Л.Л. Товкач  
(підпис, дата)**

**Керівник роботи, доц. \_\_\_\_\_ М.П. Швед  
(підпис, дата)**

**Додаток Б Завдання**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Інженерно-хімічний факультет  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних  
виробництв**

**ЗАВДАННЯ**

**до розрахункової роботи**

студентові групи ХЕ- \_\_Товкач М.М..\_\_\_\_\_

1.Тема проекту: Барабанна сушарка для сушіння нітрату амонію

2.Термін здачі студентом закінченого проекту: 10 грудня 2012р.

3.Вихідні дані до проекту: Розрахувати барабанну сушарку з підйимально-лопатевою насадкою для сушіння нітрату амонію у межах міста Одеса.

Масова продуктивність сушарки 1 кг/с.

Відносна вологість матеріалу: початкова 4 %, а кінцева 0,3.

Сушильний агент повітря.

Схема руху сушильного агента, та висушувального матеріалу - протитечійна.

Розрахунок здійснити для літніх та зимніх умов.

Літня температура Одеси становить  $21,4^{\circ}\text{C}$ , вологість 66%.

Зимня температура Одеси становить  $-2^{\circ}\text{C}$ , вологість 84%.

4.Перелік питань, які мають бути розроблені: 1) Вступ, 2) Класифікація та опис відповідного теплотехнічного обладнання, 3) Вибір типу апарата та обґрунтування його конструкції, 3) Вибір і характеристика теплоносіїв, 4) Вибір матеріалів апарата, 5) Технічні вимоги до апарату, 6) Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції, 7) Висновки, 8) Перелік посилань.

5.Перелік графічного (ілюстрованого) матеріалу: Розрахункові схеми та схематичне зображення апарату.

6.Дата видачі завдання: „\_\_” \_\_\_\_\_ 2012\_\_р.

Завдання прийняв до виконання студент

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Керівник розрахункової роботи, доцент Швед М.П.

---

(підпис, дата)

## Додаток В Зміст

### Зміст

Завдання.....	2
Перелік скорочень, умовних позначень та термінів.....	3
Вступ.....	4
1. Методи сушіння.....	5
2. Класифікація сушарок.....	8
3. Опис і обґрунтування обраної конструкції.....	9
4. Розрахунок основних параметрів сушильної камери.....	12
Висновок.....	23
Перелік посилань.....	25

					ХЕ71.066639.001 ПЗ						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Барабанна сушарка для сушіння нітрату амонію	Літ.		Лист		Листів	
Разроб.	Зайка							9		285	
Пев.	Степанюк										
Н.Контр.	Михальчук										
Затв.											
						КП імені ГОРЯ СІКОРСЬКОГО, ІХФ, МАХНН					

Вступ

					XE71.066639.001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Додаток Г Алгоритм виконання розрахункової роботи на тему  
«Підігрівач гідроксиду натрія»**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-хімічний факультет**

**Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**РОЗРАХУНКОВА РОБОТА**

**з курсу «Технологічні об'єкти управління: Теоретичні основи  
функціонування об'єктів управління»**

**на тему:**

**Підігрівач гідроксиду натрія**

**спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

Виконав студент групи ХА-71 \_\_\_\_\_ Ю. М. Магдич  
(підпис, дата)

Керівник проекту, доц. \_\_\_\_\_ М.П. Швед  
(підпис, дата)

Київ 2019



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Інженерно-хімічний факультет**  
**Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**ЗАВДАННЯ**

**до розрахункової роботи**

студентові групи ЛА-81 Магдич А.А.

1.Тема проекту: Підігрівач гідроксиду натрія

2.Термін здачі студентом закінченого проекту: 30 квітня 2012р.

3.Вихідні дані до проекту: Розрахувати підігрівач 35% водяного розчину гідроксиду натрія для забезпечення наступних технологічних умов :

- продуктивність 3,611кг/с;
- сировина 35%водяний розчин гідроксиду натрія;
- температура початкова 15 °С;
- температура кінцева температура кипіння;
- вибір гарячого теплоносія і його параметри обґрунтувати і вибрати самостійно.

4.Перелік питань, які мають бути розроблені: 1) Вступ, 2) Класифікація та опис відповідного теплотехнічного обладнання, 3) Вибір типу апарата та обґрунтування його конструкції, 3) Вибір і характеристика теплоносіїв, 4) Вибір матеріалів апарата, 5) Технічні вимоги до апарату, 6) Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції, 7) Висновки, 8) Перелік посилань.

5.Перелік графічного (ілюстрованого) матеріалу: Розрахункові схеми та схематичне зображення апарату.

6.Дата видачі завдання: „\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012\_\_р.

Завдання прийняв до виконання студ.

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Керівник розрахункової роботи, доцент Швед М.П.

////////////////////////////////////

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

## ЗМІСТ

Завдання

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів

Вступ.....

1 Класифікація та опис конструкцій теплообмінних апаратів .....

2 Вибір типу та обґрунтування конструкції підігрівача .....

3 Вибір і характеристика теплоносіїв .....

4 Вибір і характеристика матеріалів апарата .....

5 Технічна вимоги до підігрівача .....

6 Тепловий розрахунок теплообмінника.....

Висновки.....

Перелік посилань .....

					ХЕ71.066639.001 ПЗ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Підігрівач гідроксиду натрія					Літ.	Лист	Листів
Разроб.	Зайка											
Перев.	Степанюк										9	285
										КП імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО, ІХФ, МАХНВ		
Н.Контр.	Михальчук											
Затв.												

## ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$c$  – питома масова теплоємність;  
 $D$  – діаметр кожуху;  
 $d$  – внутрішній діаметр теплообмінних труб;  
 $d_3$  – еквівалентний діаметр;  
 $F$  – поверхня теплопередачі;  
 $G$  – масова витрата теплоносія;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $K$  – коефіцієнт теплопередачі;  
 $L$  – довжина теплообмінних труб;  
 $l$  – визначальний розмір в критеріях подібності;  
 $M$  – маса;  
 $N$  – число пластин, потужність;  
 $n$  – число труб, число паралельних потоків;  
 $p$  – тиск;  
 $\Delta p$  – гідравлічний опір;  
 $Q$  – теплове навантаження;  
 $q$  – питома тепла напруга;  
 $r$  – питома масова теплота конденсації (випаровування);  
 $r_3$  – термічний опір шару забруднення;  
 $S$  – площа поперечного перерізу потоку;  
 $t$  – температура;  
 $\Delta t$  – різниця температур стінки і теплоносія;  
 $\omega$  – швидкість руху теплоносія;  
 $z$  – число ходів в кожухотрубних теплообмінниках;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  
 $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення;  
 $\delta_{ст}$  – товщина стінки теплопередаючої поверхні;  
 $\lambda_{ст}$  – теплопровідність, коефіцієнт тертя;  
 $\mu$  – динамічна в'язкість;

					XE71.066639.001 ПЗ	Арк. 35
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		
						10

$\rho$  – густина;

$\sigma$  – поверхневий натяг;

$\xi$  – коефіцієнт місцевого опору;

$Re = \frac{\omega l \rho}{\mu}$  – критерій Рейнольдса;

$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$  – критерій Нусельта;

$Pr = \frac{c \mu}{\lambda}$  – критерій Прандтля;

$Gr = \frac{g l^3 \rho^2}{\mu^2} \beta \Delta t$  – критерій Грасгофа;

Індекси:

1 – теплоносій з більшою середньою температурою (гарячий);

2 – теплоносій з меншою середньою температурою (холодний);

н – початкове значення, зовнішній розмір, насос;

к – кінцеве значення, кожух;

ст – стінка;

т – теплообмінник;

тр – трубний простір;

мтр – міжтрубний простір;

ш – штуцер.

					ХЕ61.066639.001 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## Вступ

У зв'язку з розвитком промисловості на основі створення високопродуктивних установок зросло значення процесів тепло і масообміну з точки зору раціонального використання теплоенергетичних та сировинних ресурсів. Одним з важливих технічних завдань промисловості є інтенсифікація технологічних процесів та заощадження сировинних ресурсів, особливо палива. Основний шлях для досягнення цього – створення технологій та технологічних процесів, при яких весь потік сировини та всі енергетичні ресурси повністю, чи з максимальною повнотою використовуються у виробництві продукції.

Деякі галузі промисловості характеризуються високими затратами теплоти. Тому потрібно створювати високоекономічні тепловикористовуючі установки.

Процеси теплообміну мають велике значення в хімічній, нафтопереробній, металургійній, харчовій та інших галузях промисловості. Теплообмінна апаратура становить значну частку технологічного обладнання в хімічній та суміжних галузях промисловості. Питома вага на підприємствах хімічної промисловості теплообмінного обладнання складає в середньому 15–18 %, у нафтохімії – 50 %. Суттєва роль теплообмінного обладнання на хімічних підприємствах пояснюється тим, що майже усі основні процеси хімічної технології пов'язані з необхідністю підведення чи відведення теплоти.

У даному проекті розроблено теплообмінний апарат для нагрівання водного розчину луку до температури кипіння.

					XE61.066639.001 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## **1 Класифікація та опис конструкцій теплообмінних апаратів**

Залежно від способу передачі теплоти теплообмінники поділяються на дві основні групи:

- поверхневі теплообмінники, в яких обмін теплотою між теплоносіями відбувається крізь глуху стінку, що їх розділяє;
- теплообмінники змішування, в яких теплота передається внаслідок безпосереднього контакту двох теплоносіїв.

Значно рідше в хімічній промисловості застосовуються регенеративні теплообмінники, в яких нагрівання рідких середовищ відбувається за рахунок їхнього контакту з попередньо нагрітими твердими тілами – насадками, якими заповнений апарат і які періодично нагріваються іншим теплоносієм.

Найбільш поширеними є поверхневі теплообмінники, конструкції яких дуже різноманітні. Нижче буде розглянуто типові, в основному нормалізовані, конструкції поверхневих теплообмінників.

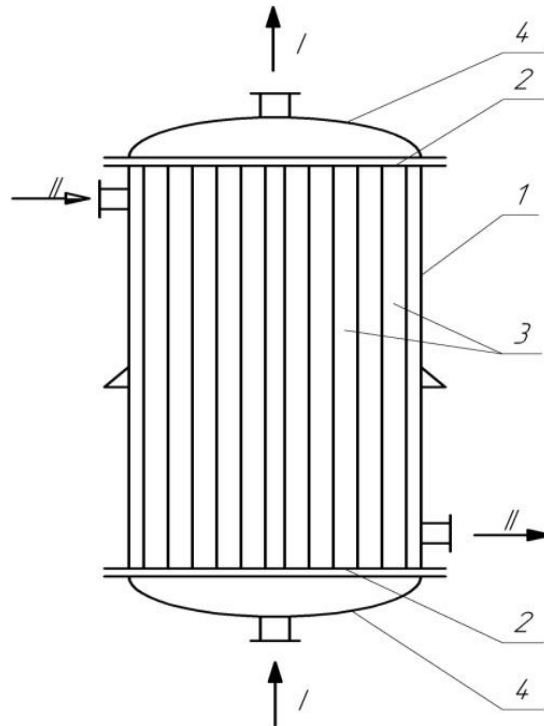
Конструкції теплообмінників мають бути простими, зручними для монтажу й ремонту. У ряді випадків конструкція теплообмінника повинна забезпечувати якомога менше забруднення поверхні теплообміну, яка має бути легкодоступною для огляду й очищення.

Поверхневі теплообмінники бувають: кожухотрубні, трубчаті, зрошувальні, змієвикові, спіральні, пластинчаті, блочні.  
(Рисунки 1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,)

### **Кожухотрубний одноходовий теплообмінник (Рисунок 1.1).**

Застосування. Даний апарат раціонально використовувати, коли швидкість процесу визначається величиною коефіцієнта тепловіддачі у міжтрубному просторі, а також у процесі випарювання рідин.

Кожухотрубний теплообмінник складається з корпусу 1 та приварених до нього трубних решіток 2. У трубних решітках закріплений пучок труб 3. До трубних решіток кріпляться (на прокладках та болтах) кришки 4.



1 – корпус; 2 – трубні решітки; 3 – труби; 4 – кришки.

Рисунок 1.1 – Схема кожухотрубного одноходового теплообмінника

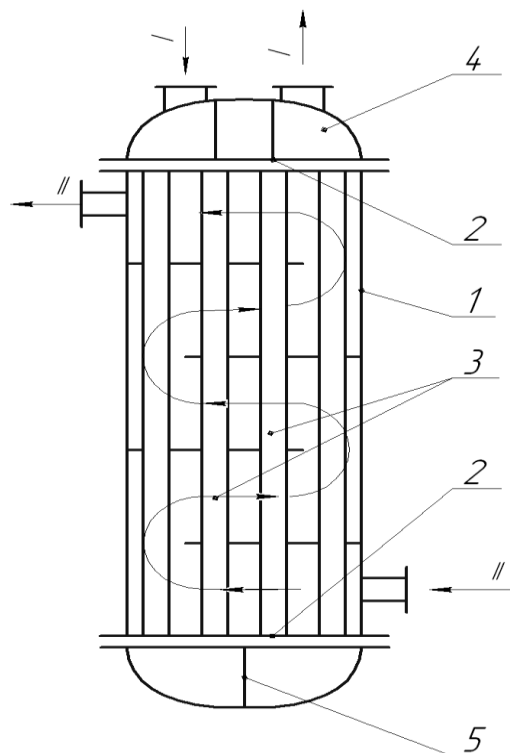
У кожухотрубному теплообміннику одна із речовин I рухається всередині труб (у трубному просторі), а інша II – у міжтрубному просторі. Речовини зазвичай направляють протитечією одна до одної. При цьому ту речовину, яку нагрівають, направляють знизу догори, а речовину, що віддає тепло, – в протилежному напрямку. Такий напрямок руху кожної речовини співпадає з напрямком, у якому прагне рухатися дана речовина під впливом зміни її густини при нагріванні чи охолодженні. Крім того, при вказаних напрямках руху досягається більш рівномірний розподіл швидкостей та ідентичні умови теплообміну за площею поперечного перерізу апарату.

Переваги: Достатньо велика швидкість в трубах при великих об'ємних видатках середовища, що в них рухається. Простота конструкції та експлуатації.

Недоліки: сумарний поперечний перетин труб відносно великий, що дозволяє отримувати достатньо високі швидкості в трубах тільки при великих об'ємних витратах речовини; низький коефіцієнт теплопередачі; невелика різниця температур середовищ, між якими відбувається теплообмін.

### **Кожухотрубний багатоходовий теплообмінник**

Застосування. Кожухотрубний багатоходовий теплообмінник застосовується для підігрівання рідин та конденсатів, а також раціонально застосовувати в системі теплообміну рідина – рідина і газ – газ, при великих теплових навантаженнях (Рисунок 1.2).



1 – корпус; 2 – трубні решітки; 3 – труби; 4 – кришки; 5 – перегородки в кришках; 6 – перегородки у міжтрубному просторі



## Рисунок 1.2 – Схема кожухотрубного багатоходового теплообмінника

В цьому теплообміннику корпус 1, трубні решітки 2, закріплені в них труби 3 та кришки 4 ідентичні зображеним на рисунку 1.2. За допомогою поперечних перегородок 5, установлених в кришках теплообмінника, труби розділені на секції, або ходи, по яким послідовно рухається рідина, яка протікає в трубному просторі теплообмінника. Зазвичай розбивку на ходи проводять таким чином, щоб в усіх секціях знаходилась однакова кількість труб.

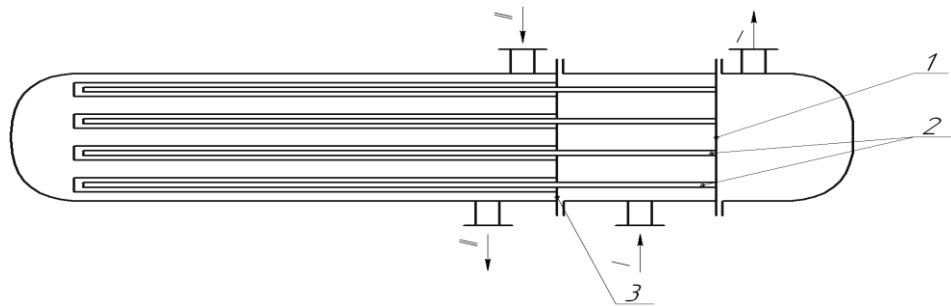
Завдяки меншій площі поперечного перерізу труб, розміщених в одній секції, в порівнянні з поперечним перерізом всього пучка труб, швидкість рідини в трубному просторі багатоходового теплообмінника збільшується (по відношенню до швидкості в одноходовому теплообміннику) в число разів, рівне числу ходів. Так, в чотирьохходовому теплообміннику (рисунок 2) швидкість в трубах при інших рівних умовах в чотири рази більше, ніж в одноходовому. Для збільшення швидкості та подовження шляху руху рідини в між трубному просторі слугують сегментні перегородки 6. В горизонтальних теплообмінниках ці перегородки слугують одночасно проміжними опорами для пучка труб.

Переваги. Більша швидкість теплообміну в порівнянні з одноходовими кожухотрубними теплообмінниками.

Недоліки. Низька рушійна сила теплопередачі, та неможливість використання при різницях температур більше  $50^{\circ}\text{C}$ .

### Кожухотрубний теплообмінник з подвійними трубами.

(Рисунок 1.3).



1,3 – трубні решітки; 2 – внутрішні труби; 4 – зовнішні труби.

Рисунок 1.3 – Схема кожухотрубного теплообмінника з подвійними трубами

**Застосування.** Теплообмінники з подвійними трубами використовуються в основному в контактнo-каталітичних і реакційних процесах.

З однієї сторони апарату розміщені дві трубні решітки, причому у решітці 1 закріплений пучок труб 2 меншого діаметра, відкритих з обох кінців, а в решітці 3 – труби 4 більшого діаметра із закритими лівими кінцями, встановленими концентрично відносно труб 2 (Рисунок 1.3).

Середовище I рухається по кільцевих просторах між трубами 2 та 4 і виводиться з міжтрубного простору теплообмінника по трубах 2. Інше середовище II рухається зверху вниз по міжтрубному простору корпусу теплообмінника, омиваючи труби 4 зовні. У теплообмінниках такої конструкції труби можуть подовжуватися під дією температури незалежно від корпусу теплообмінника.

**Переваги:** невеликі перерізи внутрішньої труби, що дає можливість досягати значних швидкостей руху теплоносіїв, що в свою чергу призводить до підвищення коефіцієнту теплопередачі.

Недоліки: дорожчий, ніж кожухотрубний одноходовий теплообмінник (металоемні); складність монтажу; більш громіздкі.

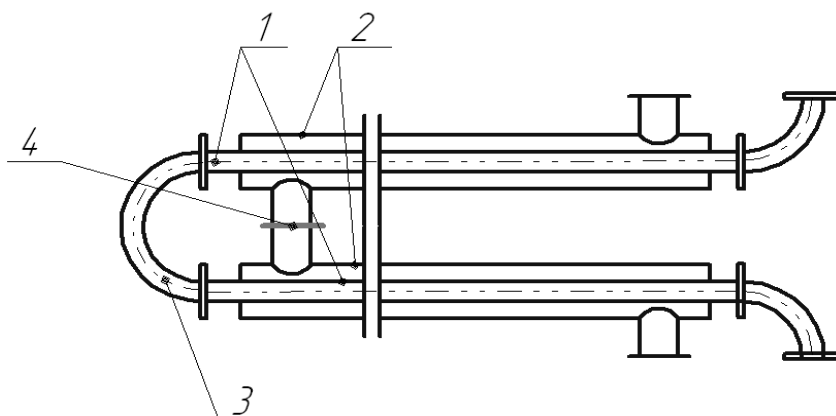
#### Двотрубний теплообмінник (Рисунок 1.4).

Застосування. В контактнo-каталітичних та реакційних процесах, що відбуваються при високих температурах, коли необхідно забезпечити вільне подовження всіх труб. Для процесів із порівняно невеликими тепловими навантаженнями і відповідно малими поверхнями теплообміну.

Теплообмінники цієї конструкції складаються з кількох послідовно з'єднаних трубних елементів, утворених двома концентрично розміщеними трубами. Один теплоносіє рухається по внутрішніх трубах 1, а інший – по кільцевому зазору між внутрішніми 1 та зовнішніми 2 трубами. Внутрішні труби з'єднуються калачами 3, а зовнішні труби – патрубками 4 (Рисунок 1.4).

Переваги: високі швидкості руху рідин; порівняно високі коефіцієнти теплопередачі; менша ймовірність відкладання накипу та забруднення поверхонь теплообміну; можливість ефективно працювати при невеликих витратах теплоносіїв.

Недоліки: більш громіздкі, ніж кожухотрубні; металоемні.



1 – внутрішні труби; 2 – зовнішні труби; 3 – калач; 4 – патрубок.

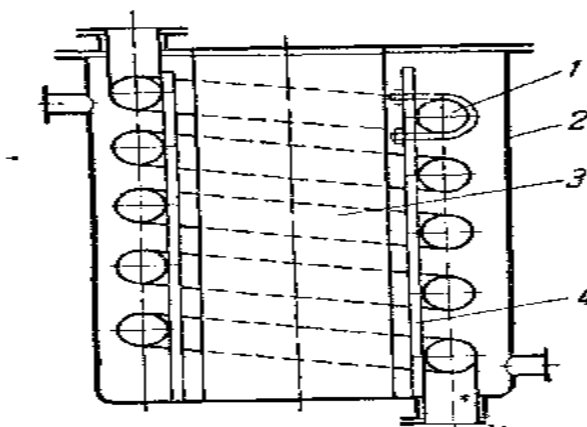
Рисунок 1.4 – Схема двотрубного теплообмінника

### Змієвиковий теплообмінник (Рисунок 1.5).

Застосування. При високих тисках і в хімічно активних середовищах, при поверхнях нагрівання до  $10 \div 15 \text{ м}^2$ .

У занурюваному змієвиковому теплообміннику краплинна рідина, газ або пар рухаються по спіральному змійовику 1, виконаному з труб діаметром 15...75 мм, який занурений у рідину, що перебуває в корпусі 2 апарату. Внаслідок великого об'єму корпусу, в якому знаходиться змійовик, швидкість рідини в корпусі незначна, що обумовлює низькі значення коефіцієнта тепловіддачі ззовні змійовика. Для його збільшення підвищують швидкість рідини всередині корпусу шляхом встановлення в ньому внутрішнього стакану 3, але при цьому значно зменшується корисно використовуваний об'єм корпусу апарату. Разом з тим в деяких випадках більший об'єм рідини, що заповнює корпус, має і позитивне значення, оскільки забезпечує більш стабільну роботу теплообмінника при коливаннях режиму. Труби змійовика кріпляться на конструкції 4 (Рисунок 1.5).

Переваги. Знаходять широке застосування внаслідок простоти будови, дешевизни, доступності для очистки й ремонту.



1 – спіральний змійовик; 2 – корпус апарату; 3 – внутрішній стакан; 4 – конструкція для кріплення змійовика

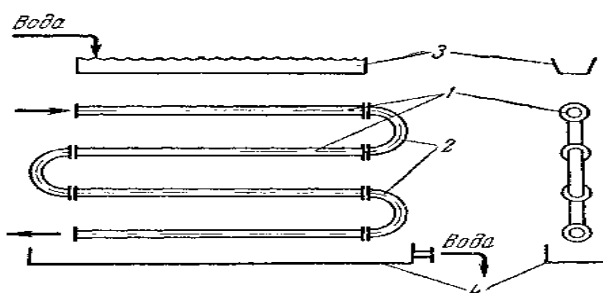
Рисунок 1.5 – Схема змієвикового теплообмінника

Недоліки. Тепловіддача в міжтрубному просторі занурених теплообмінників малоінтенсивна, оскільки тепло передається практично шляхом вільної конвекції. Тому теплообмінники такого типу працюють при низьких теплових навантаженнях.

### Зрошувальний теплообмінник

Застосування. Зрошувальні теплообмінники застосовуються головним чином в якості холодильників та конденсаторів, причому близько половини тепла відводиться при випаровуванні охолоджуючої води. В результаті витрати води різко знижуються в порівнянні з її витратами в холодильниках інших типів.

Такий теплообмінник представляє собою змійовики 1 з розміщених один над одним прямих труб, які з'єднані між собою калачами 2. Труби зазвичай розміщені в вигляді паралельних вертикальних секцій (на рисунку 1.6 показана лише одна секція) з загальними колекторами для подачі та відводу охолоджуючого середовища (води). Згори змійовики зрошуються водою, рівномірно розділеною у вигляді крапель та струменів за допомогою жолоба 3 з зубчатими краями. Відпрацьована вода відводиться з піддона 4, встановленого під змійовиками (Рисунок 1.6).



1 – секції прямих труб; 2 – калачі; 3 – розподільувальний жолоб; 4 – піддон

Рисунок 1.6 – Схема зрошувального теплообмінника

У зв'язку з випаровуванням води, що підсилюється при недостатньому зрошуванні, теплообмінники цього типу частіше за все встановлюють на відкритому повітрі; їх огорожують дерев'яними решітками (жалюзі), головним чином для того, щоб звести до мінімуму розповсюдження бризок води. Незважаючи на те, що коефіцієнти теплопередачі, які працюють по принципу перехресного струму, трохи вище, ніж в занурених, їх суттєвими недоліками є: громіздкість, нерівномірність змочування зовнішньої поверхні труб, нижні кінці яких при зменшенні витрат зрошувальної води дуже погано змочуються та практично не беруть участі в теплообміні, корозія труб киснем повітря, наявність крапель та бризок, які попадають в навколишній простір.

Переваги. Відносно малі витрати води - важлива перевага зрошувальних теплообмінників, які, крім того, відрізняються також простотою конструкції та легкістю очистки зовнішньої поверхні труб.

Недоліки. Зрошувальні теплообмінники працюють при невеликих теплових навантаженнях та коефіцієнти теплопередачі в них не високі. Їх часто виготовляють з хімічно стійких матеріалів. Громіздкість, нерівномірність змочування зовнішньої поверхні труб, кородування труб киснем повітря.

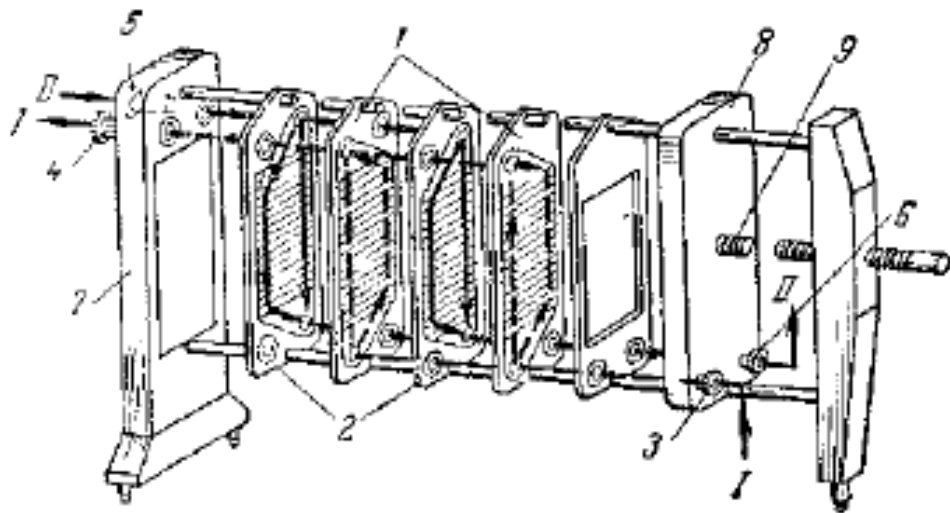
### **Пластинчастий теплообмінник**

Застосування. Процеси теплообміну між рідинами.

В пластинчастому теплообміннику поверхня теплообміну утворюється гофрованими паралельними пластинами 1,2, за допомогою яких створюється система вузьких каналів шириною 3-6 мм з хвилястими стінками. Рідини, між якими відбувається теплообмін, рухаються в каналах між сусідніми пластинами, омиваючи протилежні бокові сторони кожної пластини (Рисунок 1.7).

Пластина має на передній поверхні три прошарки. Більший прошарок обмежує канал для руху рідини 1 між пластинами, а також отвори для входу рідини 1 в канал та виходу з нього; дві малі кільцеві прокладки ущільнюють отвори, через які надходить та виходить рідина 2, яка рухається протivotоком.

На рисунку 6 рух рідини 1 показано схематично пунктирною лінією, а рідини 2 – щільною лінією. Рідина 1 надходить через штуцер 3, рухається по непарним каналам (рахуючи справа наліво) та виходить через штуцер 6 (Рисунок 1.7).



1 – парні пластини; 2 – непарні пластини; 3,4 – штуцери для входу та виходу теплоносія 1; 5,6 – те ж, що і для теплоносія 2; 7 – нерухома головна плита; 8 – рухома головна плита; 9 – стягуючий гвинтовий пристрій.

Рисунок 1.7 – Схема пластинчастого теплообмінника

Пакет пластин затискається між нерухомою плитою 7 та рухомою плитою 8 за допомогою гвинтового зажиму 9.

Внаслідок значних швидкостей, з якими рухаються рідини між пластинами, досягаються високі коефіцієнти теплопередачі, аж до 3800 Вт/кв.м і більше при малому гідравлічному опорі.

Переваги Пластинчасті теплообмінники легко розбираються та очищаються від забруднень. Підвищені теплові навантаження.

Недоліки. До них відносяться: неможливість роботи при високих тисках та важкість вибору еластичних хімічно стійких .

### **Спиральний теплообмінник**

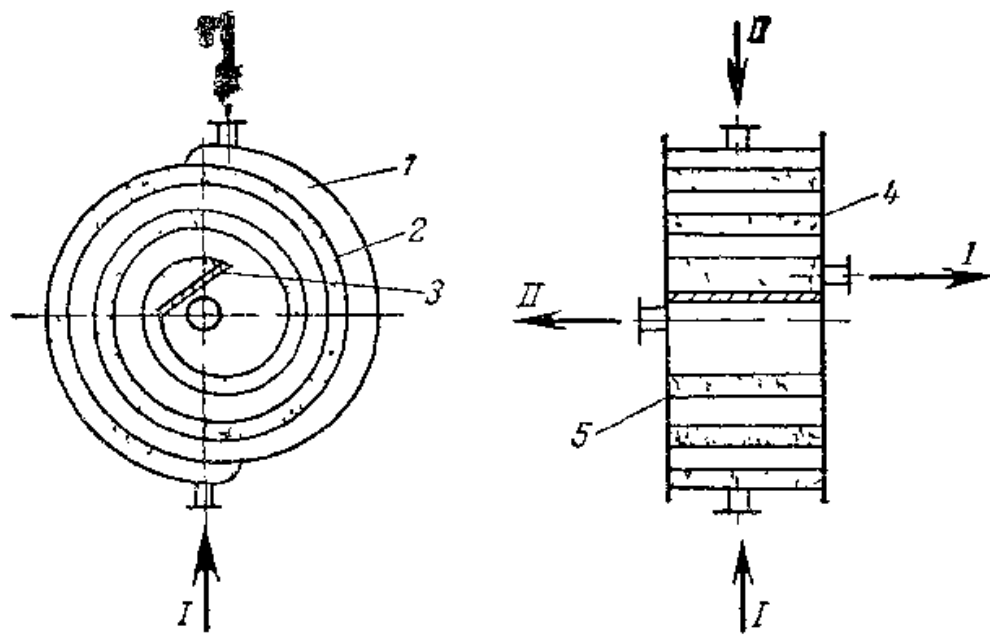
Застосування. Використовують для нагрівання та охолодження газів, рідин та парогазових сумішей. Область застосування обмежена невеликою різницею температур та тисків.

В спіральному теплообміннику поверхня теплообміну утворюється двома металевими листами 1 і 2, звернутими по спіралі. Внутрішні кінці листів приварені до глухої перегородки 3, а їх зовнішні кінці зварені один з одним. 3 торців спіралі закриті встановленими на прошарках плоскими кришками 4 та 5. Таким чином, всередині апарата утворюються два ізольованих один від іншого спіральних канали (шириною  $2\div 8$  мм), по яким, зазвичай протivoтоком, рухаються теплоносії. Як показано на рис. 10, теплоносій 1 надходить через штуцер та видаляється через боковий штуцер в правій кришці теплообмінника, а теплоносій 2 входить в верхній штуцер та видаляється через боковий штуцер в лівій кришці (Рисунок 1.8).

Переваги Спіральні теплообмінники досить компактні, працюють при високих швидкостях теплоносіїв (для рідин  $1\div 2$  м/с) та володіють при рівних швидкостях середовищ меншим гідравлічним опором, ніж трубчасті теплообмінники різних типів.

Недоліки. Ці апарати складні в виробництві та працюють при обмежених надлишкових тисках, які не перевищують 10атм, оскільки намотка спіралей ускладнюється зі збільшенням товщини листів; крім того, виникають труднощі при створенні щільного з'єднання між спіралями та кришками.





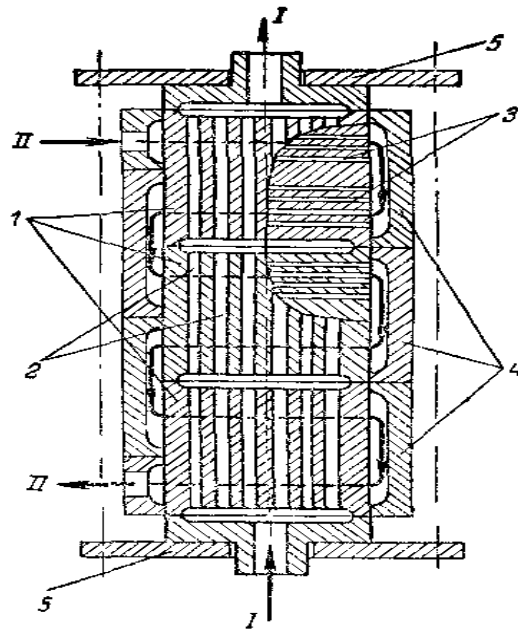
1,2 – листи, звернуті в спіралі; 3 – перегородка; 4,5 – кришки

Рисунок 1.8- Схема спірального теплообмінника

### Блочний теплообмінник

Застосування. Для процесів теплообміну, що відбуваються в хімічно агресивних середовищах.

Блочний теплообмінник складається з окремих графітових блоків 1, що мають наскрізні вертикальні канали 2 круглого перетину та перпендикулярні їм канали 3. Теплоносій I рухається по вертикальних каналах, а теплоносій II – по горизонтальним каналам 3, проходячи послідовно всі блоки. Горизонтальні канали різних блоків з'єднуються один з одним через бокові перетічні камери 4. Графітові блоки ущільнюються між собою прокладками з резини чи тефлону та стягуються торцевими кришками 5 на болтах. Крім прямокутних блоків використовують також циліндричні блоки, в яких горизонтальні канали розміщуються радіально (Рисунок 1.9).



1 – графітові блоки; 2 – вертикальні круглі канали; 3 – горизонтальні круглі канали; 4 – бокові перетічні камери; 5 – торцеві кришки

Рисунок 1.9 – Схема блочного теплообмінника з графіту

Переваги: застосування для хімічно агресивних середовищ, де застосування інших теплообмінників недопустиме.

Недоліки: застосовуються при невисоких тисках; необхідність обробки графіту для запобігання його забруднення.

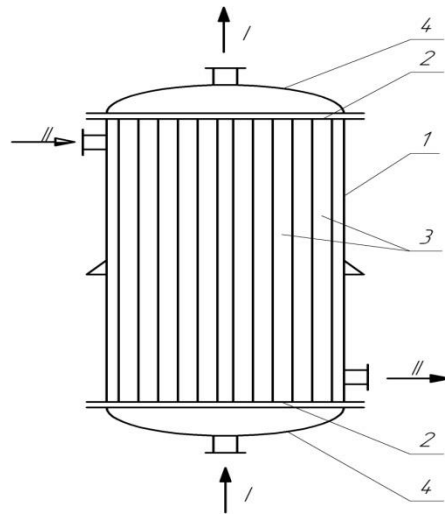
## 2 Вибір типу апарата та обґрунтування його конструкції

В загальному випуску теплообмінних апаратів для хімічної та суміжних галузей промисловості в Україні біля 80 % займають кожухотрубні теплообмінники. Ці апарати достатньо прості у виготовленні та надійні в експлуатації і одночасно достатньо універсальні, тобто можуть бути використані для здійснення теплообміну між газами, парами, рідинами в будь-якому поєднанні теплоносіїв та в широкому діапазоні їх тисків і температур. Обраний кожухотрубний теплообмінник тому, що він відповідає технологічним умовам і більшості вимог, які ставляться перед теплообмінниками:

- він є поверхневим, тобто не допускається змішування теплоносіїв;
- він має досить великий коефіцієнт теплопередачі, що дозволяє зменшити габаритні розміри апарата;
- він має просту конструкцію та простий у виготовленні;
- легкість очистки трубного простору;
- невелика металоємність;
- мала собівартість виготовлення;
- простота експлуатації.

В кожухотрубному теплообміннику один з теплоносіїв I рухається всередині труб (в трубному просторі), а інший II – в міжтрубному просторі. Теплоносії спрямовують протилежно один одному. Теплоносій, який необхідно підігрівати, спрямовують знизу вгору, а теплоносій, який необхідно охолодити, в протилежному напрямі. Такий напрям руху кожного теплоносія співпадає з напрямом, в якому рухається даний теплоносій під дією зміни його густини при нагріванні чи охолодженні. Теплообмінник складається із корпусу 1 і приварених до нього трубних решіток 2. В трубних решітках закріплений пучок труб 3. До трубних решіток кріпляться (на прокладках чи болтах) кришки 4 (Рисунок 2.1).

Внаслідок різниці температур теплоносіїв, що рухаються у трубному і між трубному просторі, відбувається теплообмін: температура більш нагрітого теплоносія зменшується, а температура менш нагрітого підвищується.

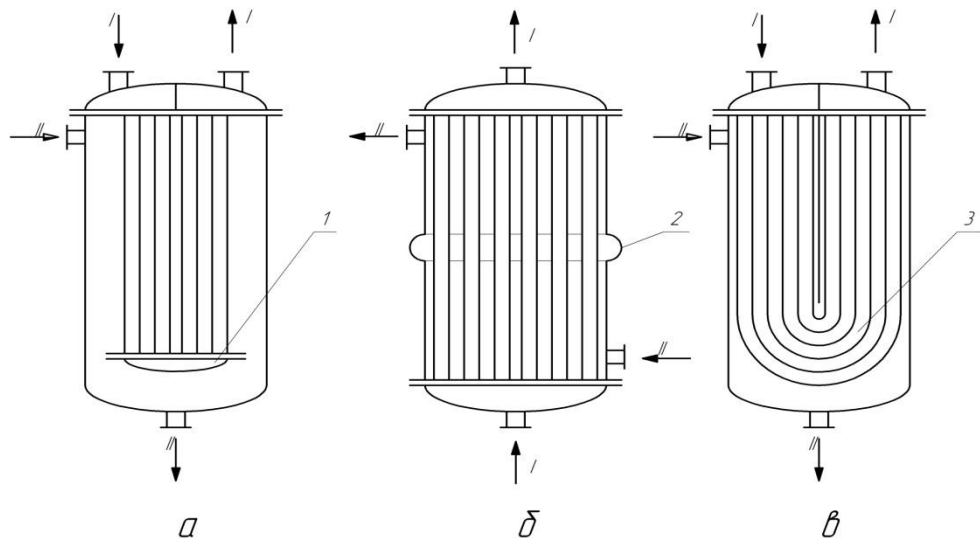


1 – корпус; 2 – трубні решітки; 3 – труби; 4 – кришки.

Рисунок 2.1 – Одноходовий кожухотрубний теплообмінник.

Кожухотрубчаті одноходові теплообмінники застосовують, коли різниця температур між трубами і кожухом менше  $40^{\circ}\text{C}$ . При більшій різниці температур труби і кожух теплообмінника подовжуються неоднаково, внаслідок цього виникають надмірні напруження в трубних решітках. Це може призвести до порушення герметичності з'єднання труб із трубними решітками і як наслідок змішування теплоносіїв. При різниці температур між трубами і кожухом теплообмінника більшою за  $40^{\circ}\text{C}$  застосовують спеціальні пристрої для зменшення руйнівної дії нерівномірного подовження труб і кожуха теплообмінника.

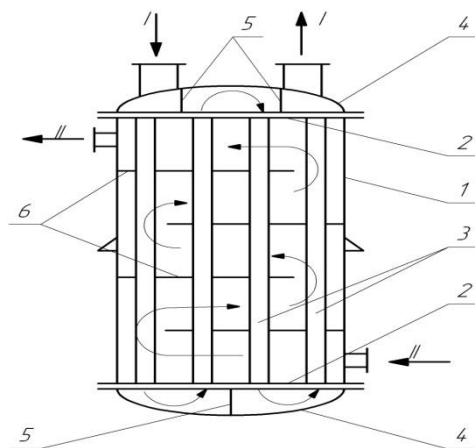
До теплообмінників з такими пристроями належать: теплообмінники з плаваючою голівкою (рисунок 1.2, а), теплообмінники з лінзовим компенсатором на кожуху теплообмінника (рисунок 1.2,б), теплообмінники з U-подібними трубами (рисунок 1.2, в).



1 – плаваюча голівка; 2 – лінзовий компенсатор; 3 – U-подібні трубки.

Рисунок 2.2 – Теплообмінники з компенсуючими пристроями: а – теплообмінник з плаваючою голівкою; б – теплообмінник з лінзовим компенсатором; в – теплообмінник з U-подібними трубками.

Для підвищення коефіцієнту тепловіддачі застосовують багатоходові теплообмінні апарати. При цьому збільшують кількість ходів як в трубному просторі так і в міжтрубному просторі. При збільшенні кількості ходів зростає інтенсивність теплообміну, але при цьому зростає гідравлічний опір, тому зазвичай кількість ходів не перевищує 5-6. Зазвичай розбивку на ходи роблять таким чином, щоб у всіх секціях знаходилась приблизно однакова кількість труб.



1 – корпус; 2 – трубні решітки; 3 – труби; 4 – кришки; 5 – перегородки в кришках; 6 – перегородки в між трубному просторі.

Рисунок 2.3 – Чотирьохходовий кожухотрубний теплообмінник.

Внаслідок меншої площі сумарного поперечного перетину труб, розміщених в одній секції, порівняно з поперечним перетином всього пучка труб, швидкість рідини в трубному просторі багатогодового теплообмінника зростає (по відношенню до швидкості в одноходовому теплообміннику) в кількість разів, що дорівнює числу ходів. Розміщення поперечних перетинок в міжтрубному просторі призводить до збільшення інтенсивності теплообміну внаслідок збільшення швидкості руху теплоносія в міжтрубному просторі.

В кожухотрубних теплообмінниках один з теплоносіїв рухається в трубах, а інший в міжтрубному просторі. Існують правила, яких слід дотримуватись при тому, коли обирають де розміщувати теплоносії, в трубному чи міжтрубному просторі:

- 1) теплоносій, із якого виділяється осад, слід пропускати з того боку поверхні теплообміну, з якого легше проводити очищення;
- 2) для досягнення більшого коефіцієнта теплопередачі теплоносій з меншим коефіцієнтом тепловіддачі слід пропускати по трубах;
- 3) теплоносій, що виявляє корозійний вплив на апаратуру, доцільно пропускати по трубах, так як в цьому випадку застосування антикорозійного матеріалу необхідно тільки для труб, решіток та камер; кожух можна виготовити із звичайного матеріалу;
- 4) для зменшення витрат теплоносій з високою температурою доцільно пропускати по трубах;
- 5) теплоносій з високим тиском необхідно пропускати по трубах, щоб корпус не знаходився під надмірним тиском.

В даному випадку, коли є два теплоносія: насичена пара і 35% розчин NaOH, розчин лугу доцільно пропускати в трубному просторі, а насичену пару в міжтрубному просторі.

### **3 Вибір та характеристика теплоносіїв**

Гідроксид натрію (каустична сода, каустик, їдкий натрій) – агресивна рідина без запаху і кольору, відносна густина 1500-1530 кг/м<sup>3</sup>, виключно добре розчиняється в воді, має в'язкість біля 50 мПа·с, широко використовується при виробництві бумаги, штучних волокон, миючих засобів, технічних мастил, як реагент чи каталізатор в хімічних реакціях, і в якості харчової добавки Е 524.

Температура кипіння водяних розчинів залежить від концентрації лугу і значно вища від температури кипіння води. Тому в якості гріючого агенту доцільно використовувати водяну пару, яка є неагресивною, доступною, нетоксичною та має відносно високі термодинамічні характеристики



#### **4 Вибір матеріалів теплообмінника**

Основними конструкційними матеріалами для зварної, кованої та литої хімічної апаратури найрізноманітніших класів, типів і хімічно-технологічного призначення є сталі вуглецеві, низьколеговані конструкційні (вуглецеві якісні, леговані), високолеговані (корозійностійкі, жаростійкі та жароміцні), чавуни (сірі, лугостійкі) та сплави зі спеціальними властивостями.

Для обичайок, днищ, фланців, трубних решіток, болтів, трубних пучків, патрубків штуцерів та інших деталей зварної хімічної апаратури відповідального призначення, яка працює з середовищами середньої та підвищеної агресивності, найчастіше використовують сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72. Допустима робоча температура стінки для такої сталі: від мінус 254 до плюс 600 °С, а її теплопровідність складає 17,5 Вт/м К. Для опорних лап і підкладних листів можна використати сталь Ст. 3пс ГОСТ 380-94 (сталі вуглецева звичайної якості). Допустимий тиск для такої сталі не більше 5 МПа, допустима робоча температура від мінус 40 до плюс 425 °С. Для шпильок та болтів можна використати Сталь 35 ГОСТ 1050-88, а для ущільнювальних прокладок – пароніт загального призначення ГОСТ 481-80.

## 5 Технічні вимоги до теплообмінника

Апарат призначено для підігрівання гідроксиду натрія водяною парою

1.Продуктивність по 35% водяному розчину лугу, кг/с 3,611

2.Температура, °С:

а) розчину лугу на вході в апарат 15

б) розчину лугу на виході з апарата – температура кипіння розчину

3.Середовище в апараті:

а) у трубному просторі – 35% розчин лугу ( вибухобезпечний, агресивний);

б) у міжтрубному просторі – водяна пара (не токсична, неагресивна)

4.Абсолютний тиск, МПа:

а) у трубному просторі 0,3

б) у міжтрубному просторі 0,3

## 6 Параметричний розрахунок підігрівача гідроксиду натрія

Метою даного розрахунку є визначення поверхні теплообміну і вибір теплообмінника з числа стандартних, для забезпечення ефективного процесу теплообміну і мінімальних габаритів апарата.

Розрахунок проводимо по методиці, приведений у [1].

Вихідні дані:

розчин ,що нагрівається	-	35% водяний розчин лугу NaOH
Видаток лугу	-	3,611кг/с
Початкова температура	-	15 °С
Кінцева температура	-	температура кипіння
Гріючий агент	-	насичена водяна пара

Прийmemo для міжтрубного простору індекс "1", а для трубного простору – індекс "2". Розрахункова схема процесу теплопередачі зображена на рисунку 6.1.

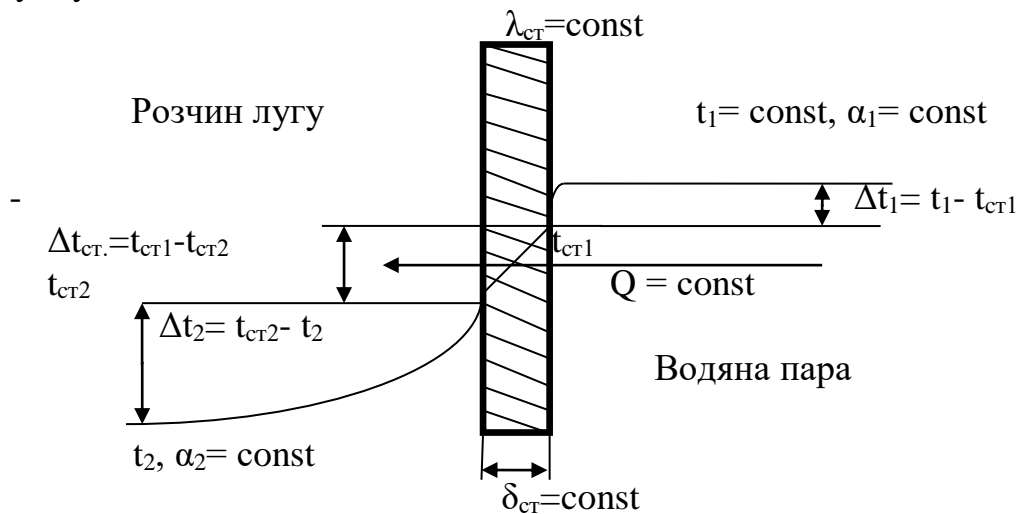


Рисунок 6.1– Розрахункова схема процесу теплопередачі.

Знайдемо температуру кипіння 35% розчину NaOH (див. Таблиця XXXVI, с. 535 [1]). Концентрація (в мас. %) водного розчину NaOH, що кипить при атмосферному тиску задана в таблиці 2.1.

Таблиця 6.1

Речовина	Температура кипіння, °C	
	120	125
	Температура	
NaOH,%	33,77	37,58

За допомогою інтерполяційної формули Лагранжа знаходимо:

$$t_{\text{еєі}} = \frac{(0,35 - 0,3758)}{(0,3377 - 0,3758)} \cdot 120 + \frac{(0,35 - 0,3377)}{(0,3758 - 0,3377)} \cdot 125 = 121,61^{\circ} \tilde{N}$$

В теплообміннику гріючим агентом є насичена водяна пара. Віддаючи тепло трубці, вода конденсується при сталій температурі. Для того, щоб нагріти розчин NaOH до температури кипіння, необхідно щоб температура насиченої водяної пари була більшою на 10-20°C, ніж температура кипіння 35% розчину NaOH. Температура конденсації насиченої водяної пари залежить від тиску. таблиці (див. Таблиця LVII, с. 549 [1]) знаходимо, що при тиску 3 кгс/см<sup>2</sup>, температура насиченої водяної пари 132,9°C. Таким чином при абсолютному тиску 3 кгс/см<sup>2</sup> можливо буде нагріти розчин лугу до температури кипіння.

Температурна схема:

$$\begin{array}{ccc} 132,9 & \longrightarrow & 132,9 \\ 15 & \longrightarrow & 121,61 \\ \hline \Delta t_6 = 117,9 & & \Delta t_M = 11,29 \end{array}$$

Середня різниця температур:

$$\Delta t_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{\Delta t_a - \Delta t_i}{2,31 \lg \frac{\Delta t_a}{\Delta t_i}} = \frac{117,9 - 11,29}{2,31 \lg \frac{117,9}{11,29}} = 45,44^{\circ} C$$

Середня температура 35 % розчину NaOH:

$$t_2 = t_1 - \Delta t_{\text{н\ddot{o}}} = 132,9 - 45,44 = 87,46^{\circ} \tilde{N}$$

Знайдемо густину 35% розчину NaOH при температурі 87,46°C (див. Таблиця IV с. 512 [1]). В таблиці задано густини 30% і 40% розчинів NaOH при температурах 80 і 100 градусах Цельсія.

Таблиця 6.2

Речовина	Температура	
	80°C	100°C
	Густина, кг/м <sup>3</sup>	
NaOH(40% розчин)	1389	1375
NaOH(30% розчин)	1289	1276

Спочатку знайдемо густину 35% розчину NaOH при температурах 80°C і 100°C за допомогою інтерполяційних формул Лагранжа.

Густина 35% розчину лугу при t=80°C:

$$\rho_{80} = \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 1389 + \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 1289 = 1339 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Густина 35% розчину лугу при t=100°C:

$$\rho_{100} = \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 1375 + \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 1276 = 1325,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Густина 35% розчину лугу при t=87,46°C:

$$\rho = \frac{(87,46 - 100)}{(80 - 100)} \cdot 1339 + \frac{(87,46 - 80)}{(100 - 80)} \cdot 1325,5 = 1333,96 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Об'ємний видаток 35% розчину лугу:

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2} = \frac{3,611}{1333,96} = 2,7069 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Теплоємність 35% розчину NaOH (див. Приложение III, стор. 808, [2]).

В додатку задані наступні теплоємності розчинів при температурах 80° і 100°.

Речовина	Температура	
	80°C	100°C
	Питома теплоємність, ккал/кг*град	
NaOH(40%)	0,832	0,832
NaOH(30%)	0,869	0,869

Теплоємність 35% розчину NaOH при 80°C:

$$c = \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 0,832 + \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 0,869 = 0,8505 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$$

Теплоємність 35% розчину NaOH при 100°C:

$$\tilde{n} = \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 0,832 + \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 0,869 = 0,8505 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$$

Теплоємність 35% розчину NaOH при 87,46°C:

$$\tilde{n}_2 = 0,8505 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$$

Теплоємність розчину луку в системі СІ:

$$\tilde{n}_2 = 0,8505 \cdot 4190 = 3563,595 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$$

Витрата теплоносія на нагрівання розчину луку:

$$Q = G_2 c_2 (t_{2e} - t_{2i}) = 3,611 \cdot 3563,6 \cdot (121,61 - 15) = 1371874,5 \text{ Дж}$$

Витрата пари з урахуванням 5% витрат:

$$G_1 = \frac{1,05Q}{r} = \frac{1371874,5 \cdot 1,05}{2171 \cdot 10^3} = 0,6635 \text{ т/год}$$

де  $r$  – питома теплота конденсації водяної пари (таблиця LVII, стор. 549 [1]).

Прийmemo значення коефіцієнта теплопередачі  $K_{\min} = 450 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  (таблиця 4.8, стор. 172 [1]). Тоді максимальна площа поверхні теплообміну становить:

$$F_{\max} = \frac{Q}{K_{\min} \Delta t_{cp}} = \frac{1371874,5}{450 \cdot 45,44} = 67,09 \text{ м}^2$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості 35% розчину NaOH (таблиця IX, стор. 516 [1]). В додатку задані наступні динамічні коефіцієнти в'язкості розчинів при температурах 80 і 100 °С .

Речовина	Температура	
	80°C	100°C
	Динамічний коефіцієнт в'язкості, мПа.с	
NaOH(40%)	3,62	2,72
NaOH(30%)	2,16	1,82

Динамічний коефіцієнт в'язкості 35% розчину лугу при  $t=80^\circ\text{C}$ :

$$\mu_{80} = \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 3,62 + \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 2,16 = 2,89 \text{ іл} \cdot \text{с}$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості 35% розчину лугу при  $t=100^\circ\text{C}$ :

$$\mu_{100} = \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 2,72 + \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 1,82 = 2,27 \text{ іл} \cdot \text{с}$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості 35% розчину лугу при  $t=87,46^\circ\text{C}$ :

$$\mu_2 = \frac{(87,46 - 100)}{(80 - 100)} \cdot 2,89 + \frac{(87,46 - 80)}{(100 - 80)} \cdot 2,27 = 2,6587 \text{ іл} \cdot \text{с}$$

Теплообмін був би більше ефективним, якби теплоносій рухався в турбулентному режимі. Але через те, що розчин лугу має високу в'язкість, що призведе при такому режимі руху до значного гідравлічного опору трубного простору і значних витрат енергії на його перекачування, то буде

доцільним, щоб розчин лугу рухався по трубах при ламінарному режимі,  $Re_2=2000$ . Тоді швидкість лугу в трубах дорівнює:

$$\omega_2 = \frac{2000\mu_2}{d_2\rho_2} = \frac{2000 \cdot 2,6587 \cdot 10^{-3}}{0,021 \cdot 1333,9645} = 0,1898 \text{ м/с}$$

Необхідна кількість труб:

$$n = \frac{V_2}{0,785 \cdot d_2^2 \cdot \omega_2} = \frac{0,0027069}{0,785 \cdot 0,021^2 \cdot 0,1898} = 41,2 \approx 42$$

З таблиці (ХХХ4.[1]) знаходимо, що є чотирьох ходовий теплообмінник діаметром 600мм з числом труб 232, розмірами 25/21, площею теплообміну 72 м<sup>2</sup>, і довжиною труб 4м. Цей теплообмінник найкраще підходить для заданого процесу нагрівання серед інших можливих типорозмірів кожухотрубчатих теплообмінників. Розрахуємо цей теплообмінник.

Уточнюємо значення критерія Рейнольдса:

$$Re_2 = 2000 \frac{n'}{n} = 2000 \frac{42}{232/4} = 1448,28$$

Визначимо коефіцієнт теплопровідності для розчину лугу. З таблиці беремо наступні дані:

Речовина	Температура	
	80°C	100°C
	Теплопровідність, ккал/м*ч*град	
NaOH (40%)	0,48	0,483
NaOH (30%)	0,484	0,487

Коефіцієнт теплопровідності 35% розчину NaOH при температурі 80°C:

$$\lambda_{80} = \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 0,48 + \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 0,484 = 0,482 \text{ ккал/м*ч*град}$$



Коефіцієнт теплопровідності 35% розчину NaOH при температурі 100°C:

$$\lambda_{100} = \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 0,483 + \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 0,487 = 0,485 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

Коефіцієнт теплопровідності 35% розчину NaOH при температурі 87,46°C:

$$\lambda = \frac{(87,46 - 100)}{(80 - 100)} \cdot 0,482 + \frac{(87,46 - 80)}{(100 - 80)} \cdot 0,485 = 0,4831 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

Переведемо коефіцієнт теплопровідності в систему СІ:

$$\lambda_2 = 0,4831 \cdot 1,16 = 0,5604 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Критерій Прандтля для розчину NaOH при температурі 87,46°C:

$$\text{Pr}_2 = \frac{c_2 \mu_2}{\lambda_2} = \frac{3563,6 \cdot 2,659 \cdot 10^{-3}}{0,5604} = 16,908$$

Визначимо коефіцієнт  $\beta$  об'ємного розширення для розчину лугу. З таблиці беремо наступні дані:

Речовина	Температура	
	80°C	100°C
	В*10 <sup>3</sup> 1/град	
NaOH (40%)	0,5	0,51
NaOH (30%)	0,52	0,55

Коефіцієнт  $\beta$  об'ємного розширення 35% розчину NaOH при температурі 87,46°C:

$$\beta_{80} = \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 0,5 + \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 0,52 = 0,51 / \text{град}$$

Коефіцієнт  $\beta$  об'ємного розширення 35% розчину NaOH при температурі 100°C:

$$\beta_{100} = \frac{(0,35 - 0,40)}{(0,30 - 0,40)} \cdot 0,51 + \frac{(0,35 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} \cdot 0,55 = 0,53 / \text{град}$$

Коефіцієнт  $\beta$  об'ємного розширення і 35% розчину NaOH при температурі 87,46°C:

$$\beta = \frac{(87,46-100)}{(80-100)} \cdot 0,51 + \frac{(87,46-80)}{(100-80)} \cdot 0,53 = 0,5174$$

Для розрахунку критерію Грасгофа в першому наближенні задамо різницею температур між стінкою і розчином лугу 25 °С:

$$Gr_2 = \frac{g \cdot l^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \beta \cdot \Delta t = \frac{9,81 \cdot 0,021^3 \cdot 1333,96^2}{(2,659 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 0,0005174 \cdot 25 = 295761,92$$

Поправку Міхєєва для випадку нагрівання рідини приймаємо рівною 1,05. Число Нуссельта знаходимо із критеріального рівняння для ламінарного руху рідини:

$$Nu = 0,17 \cdot Re_2^{0,33} \cdot Pr_2^{0,43} \cdot Gr_2^{0,1} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{cm2}} \right)^{0,25} = 0,17 \cdot 1448,28^{0,33} \cdot 16,908^{0,43} \cdot 295761,92^{0,1} \cdot 1,05 = 23,44$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до розчину лугу:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_2} = \frac{23,44 \cdot 0,5604}{0,021} = 625,5 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі при конденсації водяної пари. Приймаємо, що теплообмінник вертикальний з висотою труби Н=4м, Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі використаємо формулу(1):

$$\alpha_1 = 3,78 \cdot \lambda \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \phi \cdot n}{\mu \cdot G}} = 3,78 \cdot 0,6857 \sqrt[4]{\frac{934,883^2 \cdot 0,025 \cdot 232}{0,0002079 \cdot 0,6635}} = 8189 \frac{Вт}{м^2 \cdot К},$$

де параметри конденсату (  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  ) вибрані при температурі насиченої пари (132,9 °С) (таблиця XXXIX, стор. 537 [1]).

Прийmemo теплопровідність з боку гріючої пари  $1/r=5800$  Вт/(м²К), теплопровідність з боку розчину лугу  $1/r=5800$  Вт/(м²К). Тоді сумарна теплопровідність:

$$\frac{1}{\sum r_{cm}} = \frac{1}{\frac{1}{5800} + \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{5800}} = 2580 \frac{Вт}{м^2 К}$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{8189} + \frac{1}{2580} + \frac{1}{625,5}} = 476,19 \frac{Вт}{м^2 К}$$

Поверхнева густина теплового потоку:

$$q = K \Delta t_{cp} = 476,9 \cdot 45,44 = 21638,09 \frac{Bm}{m^2}$$

$$\Delta t_2 = q / \alpha_2 = 21638,09 / 625,5 \approx 34,6^\circ C$$

$$t_{cm2} = t_2 + \Delta t_2 = 87,46 + 34,6 = 122,06^\circ C$$

Розрахована різниця температур між стінкою і розчином лугу ( 34,6°C) значно відрізняється від раніше прийнятого значення(25°C). Для другої ітерації вибираємо:

$$\Delta t = 34^\circ C$$

$$Gr_2 = \frac{g \cdot l^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \beta \cdot \Delta t = \frac{9,81 \cdot 0,021^3 \cdot 1333,96^2}{(2,659 \cdot 10^{(-3)})^2} 0,0005174 \cdot 34 = 402236,2$$

Критерій Нуссельта:

$$Nu = 0,17 \cdot Re_2^{0,33} \cdot Pr_2^{0,43} \cdot Gr_2^{0,1} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{cm2}} \right)^{0,25} = 0,17 \cdot 1448,28^{0,33} \cdot 16,908^{0,43} \cdot 402236,2^{0,1} \cdot 1,05 = 24,1683$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до розчину лугу:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_2} = \frac{24,1683 \cdot 0,5604}{0,021} = 644,95 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$$

$$\frac{1}{\sum r_{cm}} = \frac{1}{\frac{1}{5800} + \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{5800}} = 2580 \frac{Bm}{m^2 K}$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{8189} + \frac{1}{2580} + \frac{1}{644,95}} = 485,44 \frac{Bm}{m^2 K}$$

Поверхнева густина теплового потоку:

$$q = K \Delta t_{cp} = 485,44 \cdot 45,44 = 22058,4 \frac{Bm}{m^2}$$

$$\Delta t_2 = q / \alpha_2 = 22058,25 / 644,95 \approx 34,2^\circ C$$

$$t_{cm2} = t_2 + \Delta t_2 = 87,46 + 34,2 = 121,66^\circ C$$

Після декількох екстраполявань визначимо коефіцієнт теплопровідності для 35% розчину лугу при температурі 121,66°C (див. Приложение III, стор. 810, [2]), динамічний коефіцієнт в'язкості розчину

NaOH (таблиця IX, стор. 516 [1]), теплоємність розчину NaOH (див. Приложение III, стор. 808, [2]).

$$\text{Pr}_{\text{сò 2}} = \frac{3563,59 \cdot 2,047 \cdot 10^{-3}}{0,5692} = 12,815$$

$$\left( \frac{\text{Pr}_2}{\text{Pr}_{\text{сò 2}}} \right)^{0,25} = \left( \frac{16,908}{12,815} \right)^{0,25} = 1,071$$

$$\delta = \frac{1,05 - 1,071}{1,05} \cdot 100\% = 2\%$$

Таким чином, отримане значення  $\Delta t_2 = 34,2^\circ \text{C}$  практично співпадає з прийнятим наближенням  $34^\circ \text{C}$ . Вважаємо точність розрахунку прийнятною.

Розрахункова площа поверхні теплообміну:

$$F_p = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}} = \frac{1371874,5}{485,43 \cdot 45,44} = 62,19 \text{ м}^2$$

Визначимо запас поверхні теплообміну:

$$\frac{F - F_p}{F_p} = \frac{72 - 62,19}{62,19} \cdot 100\% = 15,77\%$$

Запас площі поверхні теплообміну достатній. Через те, що середня різниця температур  $\Delta t_{cp} = 45,44^\circ \text{C}$ , що більше допустимого значення  $40^\circ \text{C}$ , приймемо тип апарату ТК.

## 7 Висновок

В результаті теплового розрахунку, були визначені основні параметри процесу теплообміну.

Параметри процесу теплообміну

Параметр	Значення
Необхідна поверхня теплообміну, $m^2$	62,19
Коефіцієнт тепловіддачі (від пари до труби), $Вт/м^2К$	8189
Коефіцієнт тепловіддачі (від труби до розчину лугу), $Вт/м^2К$	644,95
Коефіцієнт теплопередачі, $Вт/м^2К$	485,44
Режим руху розчину лугу	Ламінарний
Критерій Рейнольдса	1448,28
Швидкість руху розчину лугу, $м/с$	0,1898
Об'ємний видаток розчину лугу, $м^3/с \cdot 10^4$	2,7069
Масовий видаток розчину лугу, $кг/с$	3,611

Найбільш оптимальним для нагрівання 35% розчину NaOH від 15°C до температури кипіння є багатоходовий теплообмінник із наступною характеристикою.

Характеристика теплообмінника

Тип теплообмінника	ТК
Кількість ходів	4
Площа поверхні теплообміну, $м^2$	72
Довжина труб, $м$	4
Кількість труб	58
Внутрішній діаметр труби, $м$	0,021
Товщина стінки труби, $м$	0,002
Робочий тиск, $кгс/см^2(кПа)$	3

Площа поверхні теплообміну теплообмінника – 72 м<sup>2</sup>. Розрахункова площа теплообміну – 62,19м<sup>2</sup>. Запас поверхні теплообміну – 15,77%. Теплообмінник має бути з лінзовим компенсатором (тип ТК), оскільки різниця температур теплоносіїв, більша за 40°C, тому що подовження труб і кожуха неоднакові.

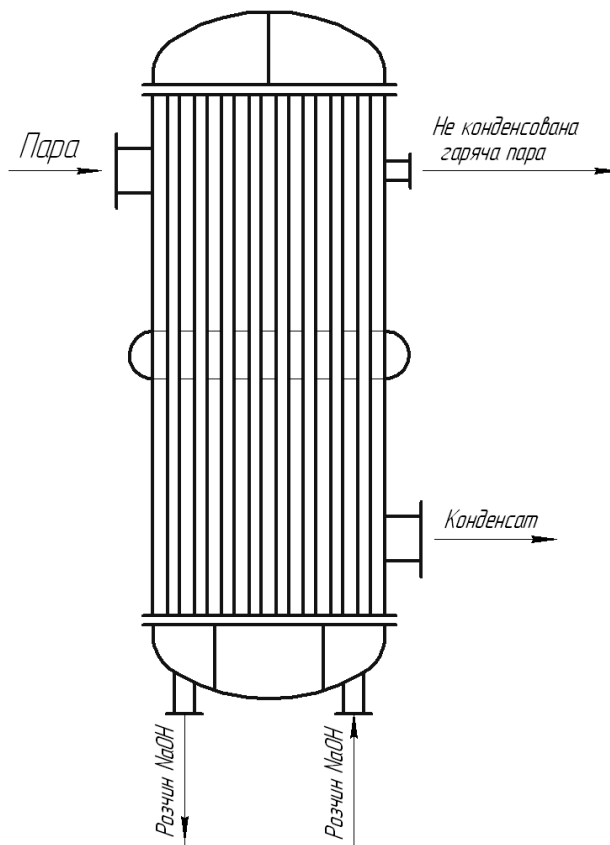


Рисунок 7.1 – Схема підігрівача

Розчин подається в трубному просторі. Водяна пара подається у верхній патрубок, конденсуючись на трубах, конденсат стікає до низу. Такий рух теплоносіїв найбільш раціональний. Так як NaOH є агресивним середовищем доцільно було б вибрати для виготовлення основних вузлів і деталей теплообмінника нержавіючу сталь марки 08X18H10T.

## 8.Список рекомендованої літератури

- 1.Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. - Л.: Химия, 1987, 576 с.
2. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Госхимиздат, 1962.
- 3.Корнієнко Я.М., Лукач Ю.Ю., Мікульонок І.О., та ін. Процеси та обладнання хімічної технології:К:НТТУ"КПІ", 2011.-300с.
4. О. Флореа, О. Смигельский. Расчеты по прцесам и аппаратам химической технологии.- М.: Химия, 1971. -448с.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1973, 750 с.
6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн - М.: Химия, 1995
7. М.К. Захаров, Г.А. Носков и др. Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Логос; Высшая школа, Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. / В.Г. Айнштейн, 2003.
8. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию/Под ред. Ю.И. Дытнерского.- М.: Химия, 1983.-272 с.
- 9.Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.
10. Лашинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры - Л.: Машиностроение, 1970. – 752 с.
11. Справочник химика. - М. - Л.: Госхимиздат, 1963, Т.1, 1071 с.
12. Справочник химика. - М. - Л.: Госхимиздат, 1965, Т.3, 1008 с.
13. Физическая химия. Под ред. Стромберг А.Г. М.: - Высшая школа, 1988, 496 с.

14. Оформление графической документации. Методические указания к выполнению курсовых и дипломных проектов / Сост. В.Н. Марчевский. – 1989.

15. Вимоги до оформлення текстової документації. Методичні вказівки до виконання курсових, бакалаврських і дипломних проектів. Укл. Степанюк А.Р., Швед М.П.



**Додаток Д Алгоритм виконання розрахункової роботи на тему  
«Розрахунок вакуум – випарної установки»**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

**Розрахункова робота  
з курсу «Технологічні об'єкти управління: Теоретичні основи  
функціонування об'єктів управління»  
на тему:**

**Розрахунок вакуум – випарної установки**

**Варіант №11**

Виконав студент групи ХЕ – 01 \_\_\_\_\_ О.О. Максименко  
(підпис, дата)

Керівник роботи, доц. \_\_\_\_\_ М.П. Швед  
(підпис, дата)

Київ – 2019

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-хімічний факультет  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних  
виробництв**

**ЗАВДАННЯ**

**до розрахункової роботи**

студентові групи ХЕ-81 Максименко О.О.

- 1.Тема проекту: Розрахунок вакуум - випарної установки
- 2.Термін здачі студентом закінченого проекту: 10 грудня 2019р.
- 3.Вихідні дані до проекту: Розрахувати вакуум – випарну установку безперервної дії та підібрати конструкцію випарного апарата (тип і виконання) для концентрування водного розчину  $\text{KNO}_3$ . Кількість розчину, що надходить 43000 кг/год, його початкова концентрація - 20%, кінцева - 50%. Температура розчину, що надходить - 30°C. Абсолютний тиск в конденсаторі – 0,026 МПа. Вологість пари  $\varphi = 4\%$ . Масова частка повітря в гріючій водяній парі 1,0% (мас). Витрати теплоти в оточуюче середовище 5% від корисно витраченої теплоти
- 4.Перелік питань, які мають бути розроблені: 1) Вступ, 2) Класифікація та опис відповідного теплотехнічного обладнання, 3) Вибір типу апарата та обґрунтування його конструкції, 3) Вибір і характеристика теплоносіїв, 4) Вибір матеріалів апарата, 5) Технічні вимоги до апарату, 6) Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції, 7) Висновки, 8) Перелік посилань.
- 5.Перелік графічного (ілюстрованого) матеріалу: Розрахункові схеми та схематичне зображення апарату.
- 6.Дата видачі завдання: „\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012\_\_р.

Завдання прийняв до виконання студент

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Керівник розрахункової роботи, доцент Швед М.П.

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

## ЗМІСТ

Вступ

Завдання

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів

1.Класифікація та опис конструкцій випарних апаратів

2.Розрахунок випарної установки.

3.Розрахунок поверхні теплопередачі

4.Визначення товщини теплової ізоляції

4. Розрахунок барометричного конденсатора

4.1. Видаток охолоджуючої води

4.2 Діаметр конденсатора

4.3Висота барометричної труби

Висновки

Технічні характеристики апарата

Технічні характеристики барометричного конденсатора

Схема апарата

Перелік посилань

					XE71.066639.001 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докum.	Підпис	Дата				
Разроб.	Заїка				Розрахунок вакуум – випарної установки	Літ.	Лист	Листів
Перев.	Степанюк						9	285
						КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО, ІХФ, МАХНВ		
Н.Контр.	Михальчук							
Затв.								

## ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$c$  – питома масова теплоємність;  
 $D$  – діаметр кожуху;  
 $d$  – внутрішній діаметр теплообмінних труб;  
 $d_3$  – еквівалентний діаметр;  
 $F$  – поверхня теплопередачі;  
 $G$  – масова витрата теплоносія;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $K$  – коефіцієнт теплопередачі;  
 $L$  – довжина теплообмінних труб;  
 $l$  – визначальний розмір в критеріях подібності;  
 $M$  – маса;  
 $N$  – число пластин, потужність;  
 $n$  – число труб, число паралельних потоків;  
 $p$  – тиск;  
 $\Delta p$  – гідравлічний опір;  
 $Q$  – теплове навантаження;  
 $q$  – питома тепла напруга;  
 $r$  – питома масова теплота конденсації (випаровування);  
 $r_3$  – термічний опір шару забруднення;  
 $S$  – площа поперечного перерізу потоку;  
 $t$  – температура;  
 $\Delta t$  – різниця температур стінки і теплоносія;  
 $\omega$  – швидкість руху теплоносія;  
 $z$  – число ходів в кожухотрубних теплообмінниках;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  
 $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення;  
 $\delta_{ст}$  – товщина стінки теплопередаючої поверхні;

## Вступ

Випарюванням називають концентрування розчинів практично нелетких або мало летких речовин в рідких летких розчинниках.

При випарюванні зазвичай здійснюється часткове видалення розчинника із всього об'єму розчину при його температурі кипіння. Тому випарювання принципово відрізняється від випаровування, котре, як відомо, проходить з поверхні розчину при будь-яких температурах нижче температури кипіння.

Отримання висококонцентрованих розчинів, практично сухих і кристалічних продуктів здешевлює і полегшує їх транспортування і зберігання.

В промисловості зазвичай випарювання проводять у спеціальних приладах — випарних апаратах. Мета даної роботи полягає у тому, щоб для процесу випарювання за заданими параметрами розрахувати випарну установку, а також вибрати випарний апарат із стандартних випарних апаратів.

## 1. Класифікація та опис конструкцій випарних апаратів

Різні конструкції випарних апаратів, що застосовуються в промисловості, можна класифікувати по типу поверхні нагріву (змійовики, трубчатки різних видів) і по її розміщенню в просторі (апарати з вертикальною, горизонтальною, іноді з похилою поверхнею нагріву), по роду теплоносія (водяна пара, високотемпературні теплоносії, електричний струм і ін.), а також в залежності від того, рухається теплоносій ззовні чи в середині труб назріваючої камери. Однак більш суттєвою ознакою випарних апаратів, що характеризує інтенсивність їх дії, слід приймати вид і кратність циркуляції розчину.

Розрізняють випарні апарати з неорганізованою, або вільною, направленою, невимушеною і вимушеною циркуляцією розчину.

Випарні апарати також поділяють на апарати прямоточні, в яких випарювання розчину проходить за один його прохід крізь апарат без циркуляції розчину і апарати, що працюють з багатократною циркуляцією розчину.

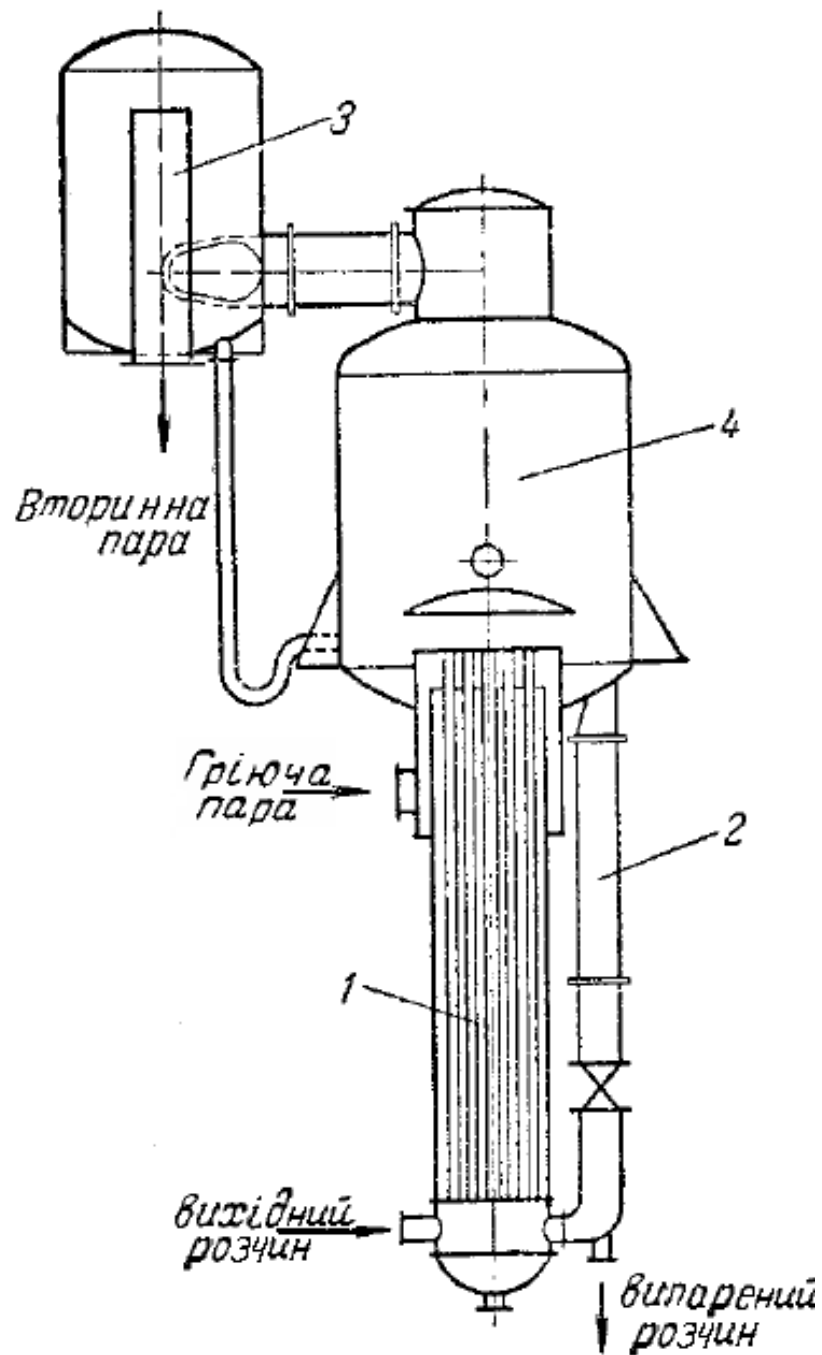
### Випарний апарат з виносною циркуляційною трубою

**Призначення.** Випарювання розведених розчинів (Рисунок 1.1).

**Принцип дії.** При розміщенні циркуляційних труб за межами корпусу апарата діаметр нагрівальної камери 1 може бути зменшений порівняно з камерою попереднього апарата., а циркуляційні труби 2 компактно розміщені навколо нагрівальної камери. Відцентровий бризкоуловлювач 3 для осушки вторинної пари також винесений за межі сепараційного (парового) простору 4 апарата.

**Переваги.** Невимушена циркуляція розчину посилюється за рахунок того, що розчин на низхідній ділянці циркуляційного контуру лише охолоджується. Більш інтенсивна тепловіддача і менші витрати металу на

квадратний метр поверхні нагріву порівняно з апаратами з підвісною нагрівальною камерою або центральною циркуляційною трубою.



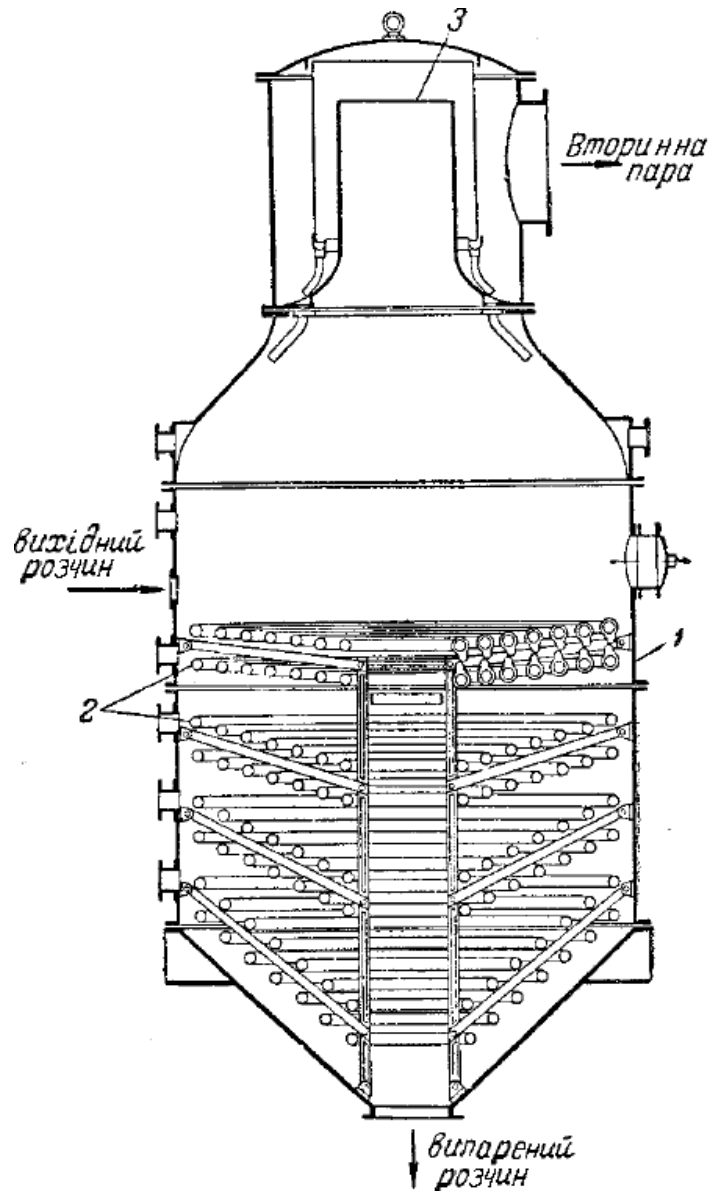
1 – нагрівальна камера; 2 – циркуляційна труба; 3 – відцентровий бризкоуловлювач; 4 – сепараційний (паровий) простір.

Рисунок 1.1 – Випарний апарат з виносною циркуляційною трубою

**Недоліки.** Збільшується складність конструкції. Неможливість випарювання розчинів, що кристалізуються.

## Змієвиковий випарний апарат

**Призначення.** Випарювання розведених розчинів. Можливе випарювання невеликих кількостей хімічно агресивних речовин (Рисунок 1.2).



1 – корпус; 2 – парові змійовики; 3 – бризкоуловлювач.

Рисунок 1.2 – Змієвиковий випарний апарат:

**Призначення.** Випарювання розведених розчинів. Можливе випарювання невеликих кількостей хімічно агресивних речовин.



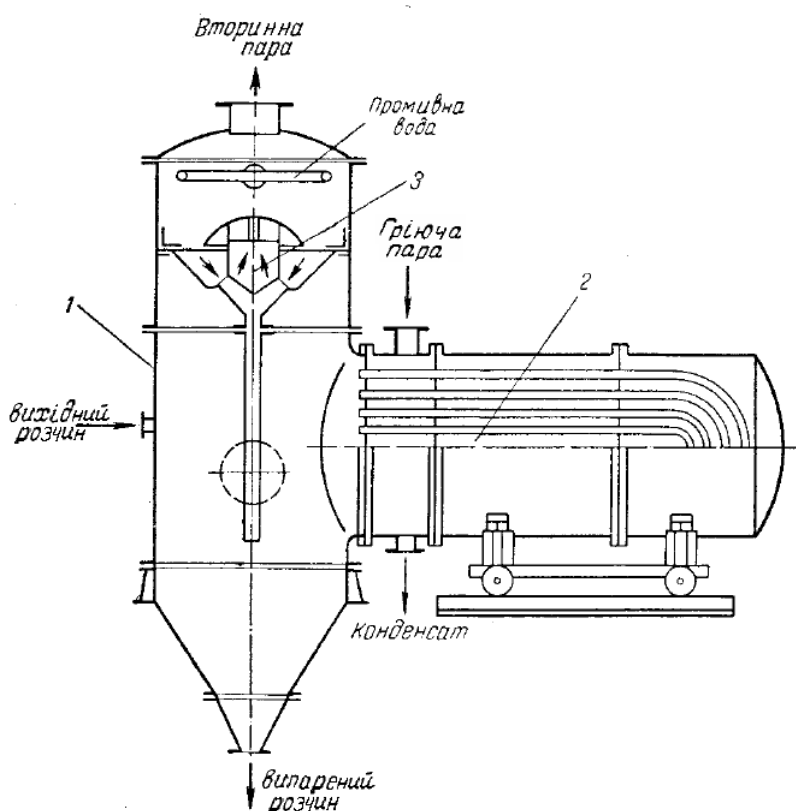
**Принцип дії.** В корпусі *1* такого апарата розміщені парові змійовики *2*, а в паровому просторі встановлено бризкоуловлювач *3*. При проходженні крізь бризкоуловлювач потік вторинної пари змінює напрямок свого руху, і з нього виділяються унесені в парюючому краплі рідини.

**Переваги.** Велика поверхня теплообміну. Можливість випарювання хімічно агресивних речовин. Компактніші, порівняно з випарними апаратами з рубашкою і відрізняються дещо більшою інтенсивністю тепловіддачі.

**Недоліки.** Очистка і ремонт змійовиків значно ускладнені.

### **Випарний апарат з горизонтальною виносною нагрівальною камерою**

**Призначення.** Для випарювання концентрованих розчинів, а також розчинів що кристалізуються (Рисунок 1.3).



*1* – корпус; *2* – нагрівальна камера; *3* – бризкоуловлювач.

Рисунок 1.3 – Випарний апарат з горизонтальною виносною нагрівальною камерою:

**Принцип дії.** Кипіння розчину в такому апараті проходить в горизонтальних трубах, приєднаних до корпусу 1 нагрівальної камери 2. В між трубному просторі камери рухається гріюча пара. Вторинна пара видаляється зверху корпусу апарата, пройшовши бризкоуловлювач 3, а випарений розчин – крізь штуцер в нижній частині конічного дна корпусу апарата. Якщо випарювання проводяться одночасно з кристалізацією то з конічного дна видаляються кристали і апарат з'єднується зі збірником чи фільтром.

**Переваги.** Можливість легкого від'єднання нагрівальної камери, встановленої на візку, для чистки, ремонту та заміни.

**Недоліки.** Умови кипіння розчину в трубах не є сприятливими, оскільки в них утворюються застійні зони, що знижують інтенсивність циркуляції і зменшують теплопередачу, а іноді призводять до місцевої кристалізації речовин. Громіздка конструкція апарата. Очистка U-подібних ускладнена, а витрати металу на одиницю поверхні нагріву значні.

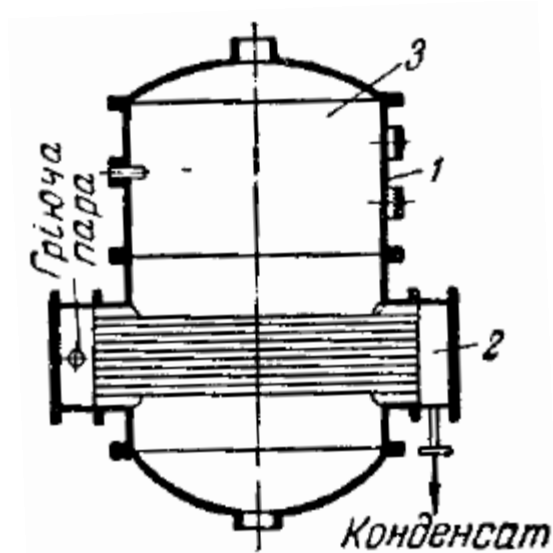
### **Випарний апарат з горизонтальною трубчатою нагрівальною камерою і вертикальним циліндричним корпусом**

**Призначення.** Випарювання розведених розчинів (Рисунок 1.4).

**Принцип дії.** В нижній частині корпусу 1 таких апаратів знаходиться нагрівальна камера 2, що складається з пучка горизонтальних труб, по яким рухається гріюча пара. Верхня частина корпусу слугує сепаратором 3, призначеного для зменшення механічного унесення рідини парою.

**Переваги.** Даний тип випарних апаратів вигідно відрізняється від вертикальних меншою висотою шару розчину, що випарюється, що значно знижує температурні втрати внаслідок гідростатичної депресії. Крім того горизонтальні апарати мають більший об'єм парового простору, що полегшує випарювання в них розчинів, які сильно піняться.

**Недоліки.** Громіздкість і металоємність конструкції. Непридатність для випарювання розчинів, що кристалізуються із-за складності механічної очистки зовнішньої поверхні труб. Невисокі коефіцієнти тепловіддачі в горизонтальних парових трубах (всередині котрих збирається шар конденсату).



1 – корпус; 2 – нагрівальна камера; 3 – сепаратор.

Рисунок 1.4 – Випарний апарат з горизонтальною трубчастою нагрівальною камерою і вертикальним циліндричним корпусом:

### **Випарний апарат з виносною нагрівальною камерою**

**Призначення.** Випарювання розведених розчинів (Рисунок 1.5) .

**Принцип дії.** Вихідний розчин подається під нижню трубну решітку нагрівальної камери і, піднімаючись по кип'ятильним трубам, випарюється. Іноді подачу вихідного розчину проводять, як показано на рисунку, в циркуляційну трубу. Вторинна пара відокремлюється від рідини в сепараторі 2. Рідина опускається по циркуляційній трубі 3, яка не обігрівається, змішується з вихідним розчином, і цикл циркуляції повторюється знову. Вторинна пара, пройшовши бризкоуловлювач 4, видаляється зверху

сепаратора. Випарений розчин відбирається крізь боковий штуцер в кінці дні сепаратора.

**Переваги.** При розміщенні нагрівальної камери за межами корпуса апарата є можливість збільшити інтенсивність випарювання не тільки за рахунок збільшення різниці густин рідини і парорідинної суміші в циркуляційному контурі, але і за рахунок збільшення довжини кип'ятильних труб.

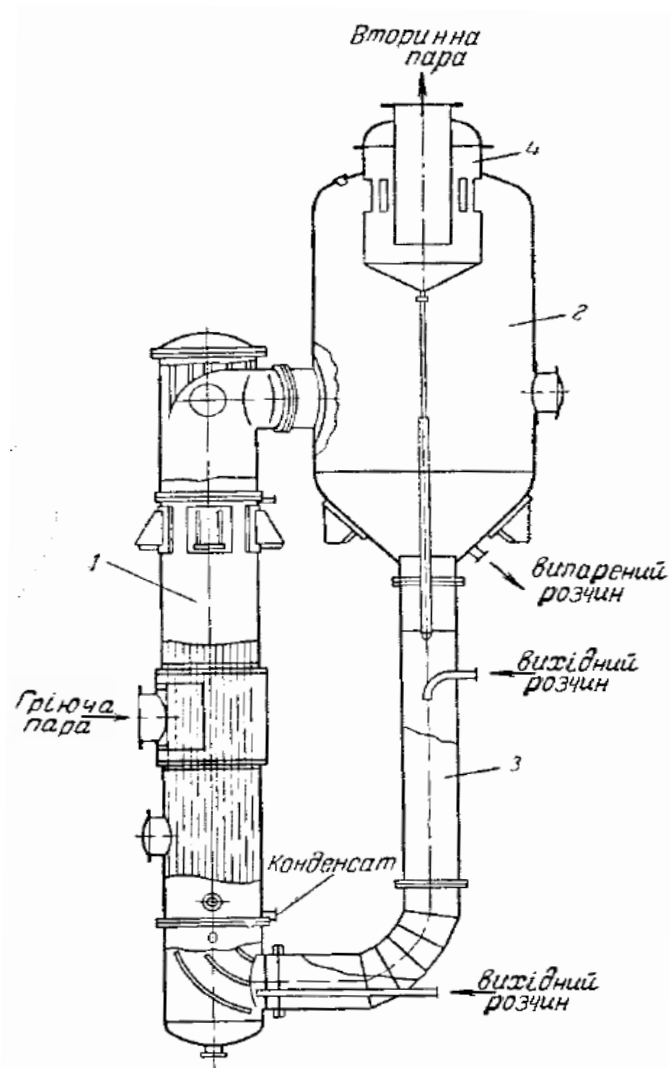


Рисунок 1. 5— Випарний апарат з виносною нагрівальною камерою:

1 – нагрівальна камера; 2 – сепаратор; 3 – необігріваема циркуляційна труба; 4 – бризкоуловлювач.

Виносна нагрівальна камера *1* легко відділяється від корпусу апарата, що полегшує і прискорює її чистку. Ревізію та ремонт нагрівальної камери можна проводити без повної зупинки апарата, якщо приєднати до його корпусу дві камери (Рисунок 1.6).

Швидкість циркуляції в апаратах з виносною нагрівальною камерою може досягати 1,5 м/с, що дозволяє випарювати в них концентровані розчини і розчини що кристалізуються, не побоюючись занадто швидкого забруднення поверхні теплообміну. Завдяки універсальності, зручності експлуатації і гарній теплопередачі апарати такого типу отримали широке поширення.

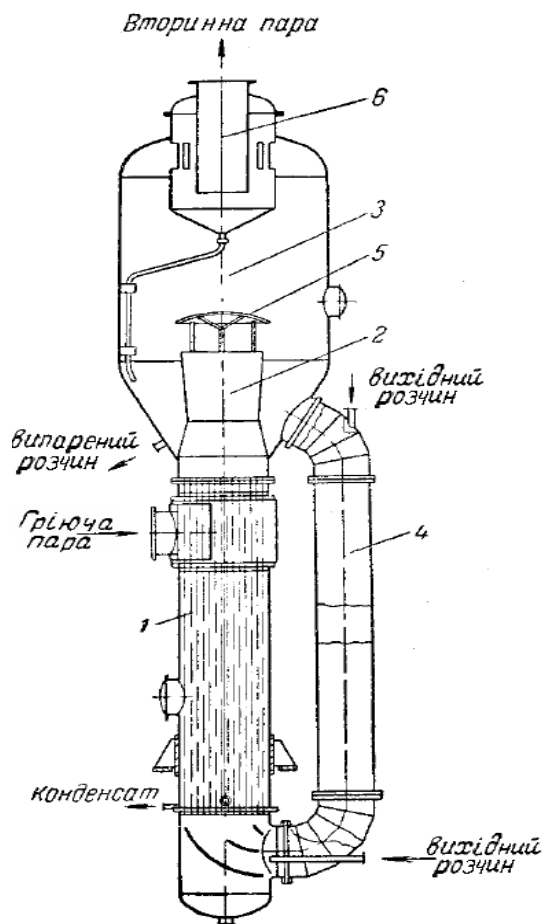
**Недоліки.** Складність та дорожня конструкції. Неможливість випарювання розчинів, що кристалізуються.

### **Випарний апарат з винесено зоною кипіння кипіння**

**Призначення.** Випарювання розчинів що кристалізуються, що мають помірну в'язкість.

**Принцип дії.** Розчин для випарювання подається знизу в нагрівальну камеру *1* і, підіймаючись по трубах (довжиною 4-7 м) вгору, внаслідок гідростатичного тиску не закипає в них. По виходу з кип'ятильних труб розчин потрапляє в трубу скипання *2*, що розширюється догори, яку встановлено над нагрівальною камерою в нижній частині сепаратора *3*. Внаслідок пониження тиску в цій трубі розчин скипає, і, таким чином, пароутворення проходить за межами поверхні нагріву.

Циркулюючий розчин опускається по зовнішній трубі *4*, що не обігривається. Випарений розчин відводиться з кармана в нижній частині сепаратора *3*. Вторинна пара, пройшовши відбійник *5* і бризкоуловлювач *6*, видаляється зверху апарата. Вихідний розчин подається або в нижню частину апарата (під трубну решітку нагрівальної камери), або зверху в циркуляційну трубу *4*.



1 – нагрівальна камера; 2 – труба скипання; 3 – сепаратор; 4 – необігріваема циркуляційна труба; 5 – відбійник; 6 – бризкоуловлювач

Рисунок 1.6 – Випарний апарат з винесено зоною ки

**Переваги.** Значно зменшено забруднення поверхні теплообміну при випарюванні розчинів, що кристалізуються, шляхом збільшення швидкості циркуляції розчину і винесення зони його кипіння за межі нагрівальної камери.

Значно знижується бризкоунесення. Киплячий розчин не дотикається до поверхні теплообміну, що зменшує відкладення накипу.

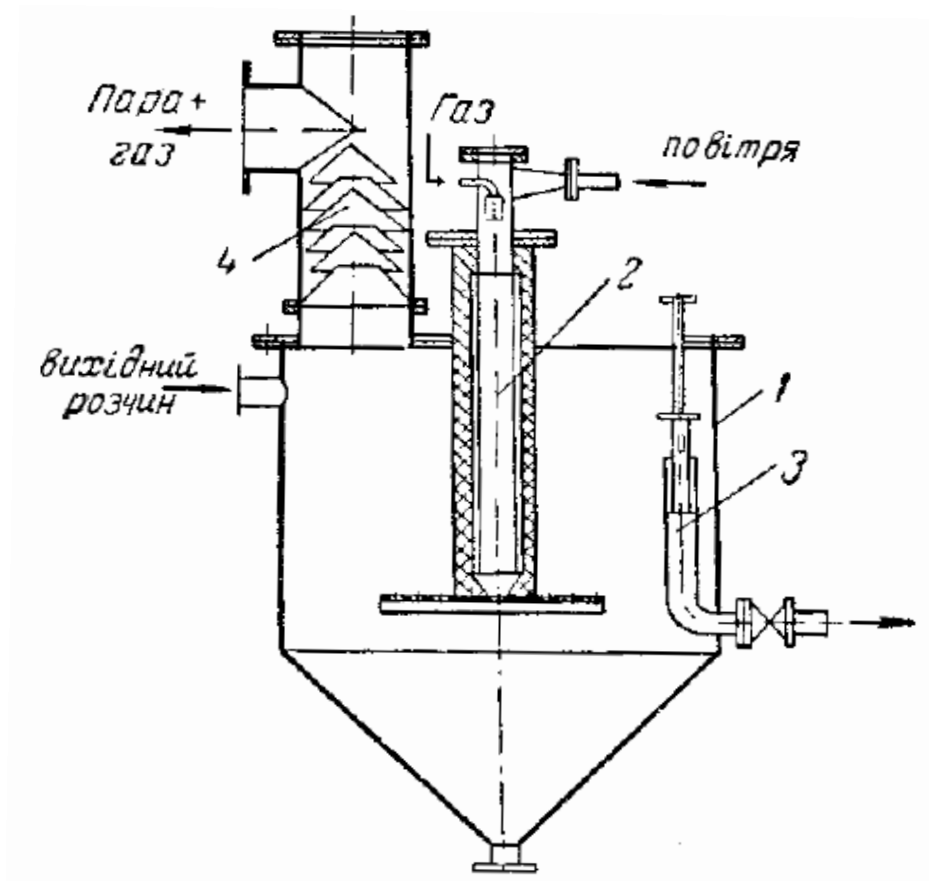
У зв'язку зі значним перепадом температур (до  $\sim 30^{\circ}\text{C}$ ) між граючою парою і розчином і малої втрати напору в зоні кипіння швидкість циркуляції в цих апаратах досягає 1,8-2 м/с.

Збільшення швидкості призводить до збільшення продуктивності і інтенсифікації теплообміну. Коефіцієнти тепловіддачі в цих апаратах досягають  $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ .

**Недоліки.** Складність конструкції.

### Випарний апарат з зануреним пальником

**Призначення.** Для випарювання деяких сильно агресивних і висококиплячих розчинів, наприклад розчинів сірної, соляної, фосфорної кислот та ін (Рисунок 1.7).



1 – корпус; 2 – пальник; 3 – переливна труба; 4 – сепаратор

Рисунок 1.7 – Випарний апарат з зануреним пальником

**Принцип дії.** В плоскій кришці корпусу 1 апарата розміщен один пальник 2 (як зображено на рисунку) або декілька пальників, занурених під рівень розчину що випарюється. Рівень розчину в апараті підтримується

постійним за допомогою переливної труби 3. Випарений розчин відводить з кінцевого дна апарата, а кристали, що випадають, тут відсмоктуються за допомогою ерліфта. Паро-рідинна суміш відводиться із простору над рідиною через сепаратор 4.

**Переваги.** При барботуванні нагрітих газів через шар розчину створюється значна міжфазна поверхня і проходить перемішування рідин бульбашками газу. В результаті досягається інтенсивний теплообмін. Можливість випарювання сильно агресивних розчинів.

**Недоліки.** Складність конструкції. Висока собівартість.

### **Випарний апарат з вимушеною циркуляцією**

**Призначення.** Для випарювання розчинів, що кристалізуються та утворюють накип.

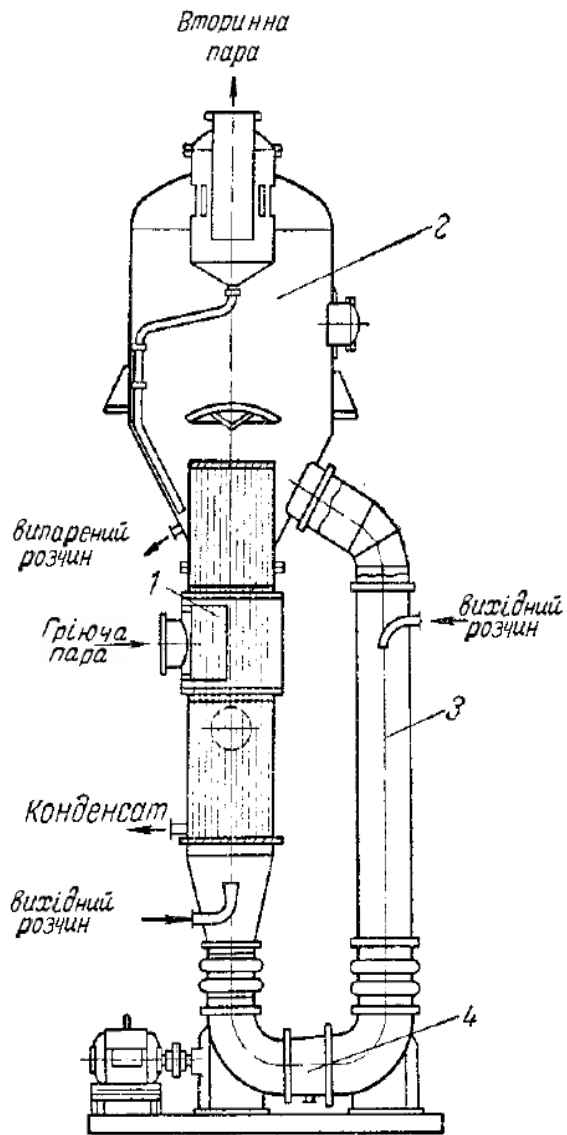
**Принцип дії.** Апарат має виносну нагрівальну камеру 1, сепаратор 2 і циркуляційну трубу 3, що не обігрівается, в яку подається вихідний розчин. Циркуляція розчину проводиться насосом 4 (Рисунок 1.8).

При великій швидкості руху розчину що випарюється кипіння його проходить на короткій ділянці перед виходом із кип'ятильних труб. Таким чином, зона кипіння виявляється переміщеною в саму верхню частину нагрівальної камери. На більшій частині довжини труб рідина лише трохи перегрівається. Це пояснюється тим, що тиск внизу труби більше тиску поблизу її верхнього краю на величину гідростатичного тиску стовпа рідини і гідравлічного опору труби.

**Переваги.** Значна швидкість циркуляції протидіє утворенню накипу та кристалізації. Швидкість циркуляції не залежить від рівня рідини в трубах, а також від інтенсивності пароутворення.

**Недоліки.** Складність конструкції. Відносно висока собівартість





1 – нагрівальна камера; 2 – сепаратор; 3 – циркуляційна труба;  
4 – циркуляційний насос.

Рисунок 1.8 – Випарний апарат з вимушеною циркуляцією:

### Випарний плівковий апарат з низхідною плівкою

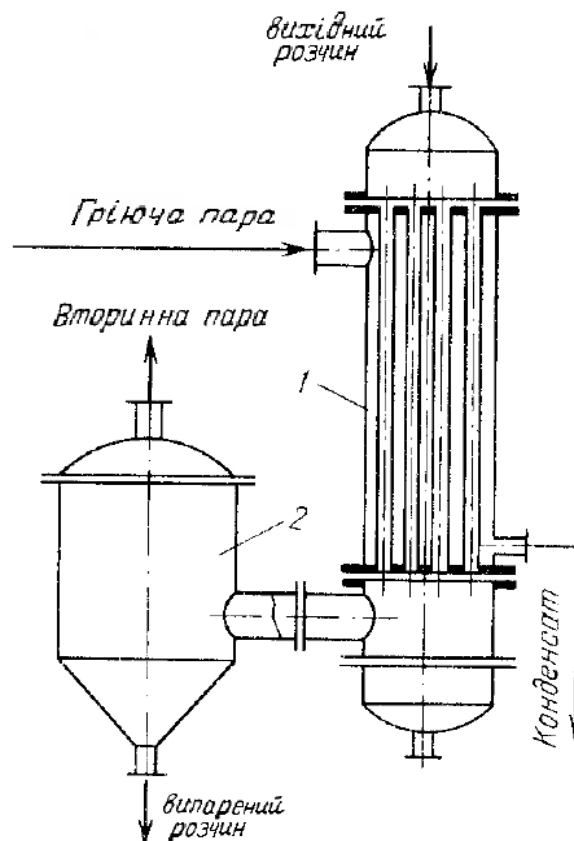
**Призначення.** Ці апарати придатні до випарювання розчинів, що схильні до піноутворення (Рисунок 1.9).

**Принцип дії.** Вихідний розчин подається у верхню частину нагрівальної камери 1, де зазвичай розміщено розподільувач рідини, з якого остання по трубах стікає донизу. Вторинна пара, що утворюється, також

рухається донизу нагрівальної камери, звідки разом з рідиною потрапляє в сепаратор 2 для відокремлення від розчину.

**Переваги.** Можливість випарювати розчини, що схильні до піноутворення.

**Недоліки.** Висока чутливість до зміни навантаження по рідині, особливо при малих видатках розчинів. Існує визначений мінімальний видаток розчину, нижче якого не вдається досягти повного змочування поверхні теплопередачі. Це може призвести до місцевого перегріву трубок, виділенню твердих осадів, різкому зниженню інтенсивності теплопередачі. Неможливо випарювати розчини, що кристалізуються. Потрібні великі промислові приміщення.



1 – нагрівальна камера; 2 – сепаратор; 3 – бризкоуловлювач

Рисунок 1.9 – Випарний плівковий апарат з низхідною плівкою:

## 2. РОЗРАХУНОК ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

Розрахунок ведемо згідно з прикладом розрахунку наведеному в книзі «Иофе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии»

### 2.1 ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНІ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ВИПАРНИХ АПАРАТІВ

Поверхня теплопередачі кожного корпусу випарної установки визначається з основного рівняння теплопередачі:

$$F = Q / (K \Delta t_k).$$

Для визначення теплових навантажень  $Q$ , коефіцієнтів теплопередачі  $K$  і корисних різниць температур  $\Delta t_k$  необхідно знати розподіл води, що випарюється, концентрації розчинів і їх температури кипіння по корпусах. Ці величини знаходять за методом послідовних наближень.

Перше наближення

Продуктивність установки по воді, що випарюється визначається з рівняння матеріального балансу:

$$W = G_n (1 - x_n / x_k).$$

Підставивши, отримаємо:

$$W = 20000(1 - 14 / 37) / 3600 = 3.45 \text{ кг} / \text{с}$$

#### 2.1.1 Концентрація розчину, що випарюється

Розподіл концентрацій розчину по корпусах установки залежить від співвідношення навантажень по воді що випаровується в кожному апараті. В першому наближенні на основі практичних даних приймають , що

продуктивність по воді, що випарюється розподіляється між корпусами згідно із співвідношенням

$$w_1 : w_2 : w_3 = 1,0 : 1,1 : 1,2 .$$

Тоді

$$w_1 = 1,0W / (1,0 + 1,1 + 1,2) = 1,0W / 3,3 = 1,047 \text{ кг} / \text{с};$$

$$w_2 = 1,1W / 3,3 = 1,151 \text{ кг} / \text{с};$$

$$w_3 = 1,2W / 3,3 = 1,256 \text{ кг} / \text{с}.$$

Далі розраховують концентрацію розчину по корпусах:

$$x_1 = G_n x_n / (G_n - w_1) = 5.556 \cdot 14 / (5.556 - 1.047) = 17.25\%$$

$$x_2 = G_n x_n / (G_n - w_1 - w_2) = 5.556 \cdot 14 / (5.556 - 1.047 - 1.151) = 23.16\%$$

$$x_3 = G_n x_n / (G_n - w_1 - w_2 - w_3) = 5.556 \cdot 14 / (5.556 - 1.047 - 1.151 - 1.256) = 37\%.$$

Концентрація розчину в останньому корпусі  $x_3$  відповідає заданій концентрації випареного розчину  $x_k$ .

### 2.1.2 Температури кипіння розчинів

Загальний перепад тиску в установці рівний:

$$\Delta P_{заг} = P_{r_1} - P_{бк} = 0.103 - 0.018 = 0.085 \text{ МПа}$$

В першому наближенні загальний перепад тиску розподіляють між корпусами порівну. Тоді тиски гріючих парів в корпусах (в МПа) рівні:

$$P_{r_1} = 0.103;$$

$$P_{r_2} = P_{r_1} - \Delta P_{заг} / 3 = 0.103 - 0.085 / 3 = 0.075;$$

$$P_{r_3} = P_{r_2} - \Delta P_{заг} / 3 = 0.075 - 0.085 / 3 = 0.046.$$

Тиск пари в барометричному конденсаторі

$$P_{бк} = P_{r_3} - \Delta P_{заг} / 3 = 0.046 - 0.085 / 3 = 0.018$$

Що відповідає заданому значенню  $P_{бк}$ .

По тискам парів знаходимо їх температури і ентальпії [1]:

$P$ , МПа	$t$ , °C	$I$ , кДж/кг
$P_{r_1} = 0.103$	$t_{r_1} = 45.92$	$I_1 = 2582$
$P_{r_2} = 0.075$	$t_{r_2} = 39.67$	$I_2 = 2570$
$P_{r_3} = 0.046$	$t_{r_3} = 32.95$	$I_3 = 2553$
$P_{\text{ок}} = 0.018$	$t_{\text{ок}} = 15.34$	$I_{\text{ок}} = 2522.8$

При визначенні температури кипіння розчинів в апаратах виходять із наступних припущень. Розподіл концентрацій розчинів в випарному апараті з інтенсивною циркуляцією практично відповідає моделі ідеального перемішування. Тому концентрацію киплячого розчину приймають рівній кінцевій в даному корпусі і, відповідно, температуру кипіння розчину визначають при кінцевій концентрації.

Зміна температури кипіння по висоті кип'ятильних труб проходить внаслідок зміни гідростатичного тиску стовпа рідини. Температуру кипіння розчину в корпусі приймають ту яка відповідає температурі кипіння в середньому шарі рідини. Таким чином, температура кипіння розчину в корпусі відрізняється від температури гріючої пари в наступному корпусі на суму температурних втрат  $\sum \Delta$  від температурної ( $\Delta'$ ), гідростатичної ( $\Delta''$ ) і гідродинамічної ( $\Delta'''$ ) депресій ( $\sum \Delta = \Delta' + \Delta'' + \Delta'''$ ).

Гідродинамічна депресія зумовлена втратою тиску пари на подолання гідравлічних опорів трубопроводів при переході від корпусу до корпусу. Зазвичай в розрахунках приймають  $\Delta''' = 1,0 - 1,5$  град на корпус. Прийmemo для кожного корпусу  $\Delta''' = 1$  град. Тоді температури вторинних парів в корпусах (в °C) рівні:

$$t_{\text{en1}} = t_{r_2} + \Delta'''_1 = 45.92 + 1,0 = 46.92;$$

$$t_{\text{en2}} = t_{r_3} + \Delta'''_2 = 39.67 + 1,0 = 40.67;$$

$$t_{\text{en3}} = t_{\text{ок}} + \Delta'''_3 = 32.95 + 1 = 33.95$$

Сума гідродинамічних депресій

$$\sum \Delta''' = \Delta_1''' + \Delta_2''' + \Delta_3''' = 1 + 1 + 1 = 3^\circ\text{C}.$$

За температурами вторинних парів визначимо їх тиски. Вони рівні відповідно (в МПа):  $P_{en1} = 0.0106$  МПа;  $P_{en2} = 0.0076$  МПа;  $P_{en3} = 0.0053$  МПа.

Гідростатична депресія зумовлена різницею тисків в середньому шарі киплячого розчину і на його поверхні. Тиск в середньому шарі розчину, що кипить  $P_{cp}$  кожного корпусу визначається за рівнянням:

$$P_{cp} = P_{en} + \rho q H_{опт} / 2$$

$$H_{опт} = H \cdot (0.26 + 0.0014 \cdot \epsilon (\rho_{\text{пара}} - \rho_{\text{води}}))$$

де  $H$  – висота кип'ятильних труб в апараті, м;  $\rho$  – густина розчину, що кипить, кг/м<sup>3</sup>;  $\epsilon$  – паронаповнення (об'ємна частка пару в киплячому розчині), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Для вибору значень  $H$  необхідно орієнтовно оцінити поверхню теплопередачі випарного апарата  $F_{op}$ . При кипінні водних розчинів можна прийняти питоме теплове навантаження апаратів з невимушеною циркуляцією  $q = 20\,000 - 40\,000$  Вт/м<sup>2</sup>. Прийmemo  $q = 30\,000$  Вт/м<sup>2</sup>. Тоді поверхня тепловіддачі 1-го корпусу орієнтовно рівна:

$$F_{op} = \frac{Q}{q} = \frac{w_1 r_1}{q} = \frac{1.047 \cdot 2256.76 \cdot 10^3}{30000} = 78.697 \text{ м}^2.$$

де  $r_1$  – теплота пароутворення вторинної пари, Дж/кг.

По ГОСТ 11987-81 [2] трубчаті апарати з невимушеною циркуляцією і співвісною граючою камерою (тип 1, виконання 2) складаються із кип'ятильних труб висотою 3 і 4 м при діаметрі  $d_s = 38$  мм і товщині стінки  $\delta_{cm} = 2$  мм. Прийmemo висоту кип'ятильних труб  $H = 4$  м.

Густина водних розчинів, в тому числі розчину KNO<sub>3</sub>[3], при температурі 30°C і відповідних концентраціях в корпусах рівна:

$$\rho_1 = 1169 \text{ кг/м}^3, \rho_2 = 1232 \text{ кг/м}^3, \rho_3 = 1388.5 \text{ кг/м}^3.$$

Густина води:  $\rho_1 = 954.4$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 965.34$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_3 = 975.86$  кг/м<sup>3</sup>

При визначенні густини розчину в корпусах нехтуємо її зміною з підвищенням температури від 40°C до температури кипіння із-за малого значення коефіцієнта об'ємного розширення і орієнтовно прийнятого значення  $\epsilon$ .

Тиск в середньому шарі кип'ятильних труб корпусів (в Па) дорівнюють:

$$P_{1cp} = P_{enl} + \rho_1 g H / 2 = 1.087 + 4 \cdot (0.26 + 0.00014 \cdot (1169 - 1000)) \cdot 9.81 \cdot 1.169 \cdot 10^{-6} = 1.099 \text{ МПа};$$

Аналогічно для інших знаходимо:  $P_{2cp} = 0,743$  МПа,  $P_{3cp} = 0,393$  МПа

Цим тискам відповідають наступні температури кипіння і теплоти випаровування розчинника [1]:

$P$ , МПа	$t$ , °C	$r$ , кДж/кг
$P_{1cp} = 1,099$	$t_{1cp} = 101,478$	$r_{enl} = 2257$
$P_{2cp} = 0,743$	$t_{2cp} = 90,644$	$r_{en2} = 2422,9$
$P_{3cp} = 0,393$	$t_{3cp} = 74,349$	$r_{en3} = 2322,5$

Визначимо гідростатичну депресію по корпусах (в °C):

$$\Delta''_1 = t_{1cp} - t_{enl} = 101.478 - 101.35 = 0.128;$$

$$\Delta''_2 = t_{2cp} - t_{en2} = 90.644 - 90.485 = 0.159;$$

$$\Delta''_3 = t_{3cp} - t_{en3} = 74.349 - 73.854 = 0.495$$

Сума гідростатичних депресій

$$\sum \Delta'' = \Delta''_1 + \Delta''_2 + \Delta''_3 = 0.128 + 0.153 + 0.495 = 0.782^\circ\text{C}$$

Температурну депресію  $\Delta'$  визначимо з рівняння

$$\Delta' = 16,2 \cdot \Delta'_{атм} T^2 / r_{en},$$

де  $T$  – температура парів в середньому шарі кип'ятильних труб, К;  $\Delta'_{атм}$

- температурна депресія при атмосферному тиску [3].

Знаходимо значення  $\Delta'$  по корпусах (в °C):

$$\Delta'_1 = 16.2 \cdot 376.642^2 \cdot 1.5 / 2249 \cdot 10^3 = 1.533$$

$$\Delta'_2 = 2.098;$$

$$\Delta'_3 = 4.329$$

Сума температурних депресій

$$\sum \Delta' = \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3 = 1.533 + 2.098 + 4.329 = 7.96^\circ\text{C}.$$

Температури кипіння розчинів в корпусах дорівнюють (в  $^\circ\text{C}$ ):

$$t_{\kappa 1} = t_{r 2} + \Delta'_1 + \Delta''_1 + \Delta'''_1 = 100.976 + 1.533 + 1 + 1.672 = 105.181$$

$$t_{\kappa 2} = t_{r 3} + \Delta'_2 + \Delta''_2 + \Delta'''_2 = 89.23 + 1 + 2.098 + 2.93 = 95.258;$$

$$t_{\kappa 3} = t_{\theta \kappa} + \Delta'_3 + \Delta''_3 + \Delta'''_3 = 71 + 1 + 4.329 + 10 = 86.329.$$

### 2.1.3 Корисна різниця температур

Загальна корисна різниця температур дорівнює:

$$\sum \Delta t_{\text{кор}} = \Delta t_{\text{кор}1} + \Delta t_{\text{кор}2} + \Delta t_{\text{кор}3}.$$

Корисні різниці температур по корпусах (в  $^\circ\text{C}$ ) дорівнюють:

$$\Delta t_{\text{кор}1} = t_{r1} - t_{\kappa 1} = 110.325 - 105.181 = 5.144;$$

$$\Delta t_{\text{кор}2} = t_{r2} - t_{\kappa 2} = 100.976 - 95.258 = 5.718;$$

$$\Delta t_{\text{кор}3} = t_{r3} - t_{\kappa 3} = 89.23 - 86.329 = 3.901.$$

Тоді загальна корисна різниця температур

$$\sum \Delta t_{\text{кор}} = 5.144 + 5.718 + 3.901 = 14.763^\circ\text{C}.$$

Перевіримо загальну корисну різницю температур:

$$\sum \Delta t_{\text{кор}} = t_{r1} - t_{\theta \kappa} - (\sum \Delta' + \sum \Delta'' + \sum \Delta''') = 110.325 - 70 - 3 - 14.602 - 7.96 = 14.763^\circ\text{C}.$$



## 2.1.4 Визначення теплових навантажень

Вихідні дані для розрахунку

	Корпус		
	1	2	3
Кількість вихідного розчину, кг/с	0,417	0,318	0,209
конц. Вих. Р-ну, %	14	13,11	19,952
температура вих. Р-ну	110,325	105,181	95,258
температура упареного р-ну	105,184	95,258	86,329
Теплоємність вихідного р-ну Дж/(кг*К)	3791	3700	3467
ентальпія вторинного пару, Дж/кг	2677	2652	2620
теплота пароутворення, (Дж/кг)*10 <sup>3</sup>	2243	2275	2293

Видаток гріючої пари в перший корпус, продуктивність кожного корпусу по випареній воді і теплові навантаження по корпусам визначимо шляхом сумісного вирішення рівнянь теплових балансів по корпусам і рівняння балансу по воді для всієї установки:

$$Q_1 = G_{zn} \cdot r_{zn} = 1,15 [G_n c_n (t_{k1} - t_n) + w_1 (I_{en1} - c_{\theta} t_{k1}) + Q_{1конц}]$$

$$Q_2 = w_1 r_1 = 1,03 [(G_n - w_1) c_1 (t_{k2} - t_{k1}) + w_2 (I_{en2} - c_{\theta} t_{k2}) + Q_{2конц}]$$

$$Q_3 = w_2 r_2 = 1,03 [(G_n - w_1 - w_2) c_2 (t_{k3} - t_{k2}) + w_3 (I_{en3} - c_{\theta} t_{k3}) + Q_{3конц}]$$

$$W = w_1 + w_2 + w_3,$$

де 1,15 – коефіцієнт, що враховує 15% втрат тепла в навколишнє середовище;  $c_n, c_1, c_2$  – теплоємності розчинів відповідно вихідного в першому і в другому корпусах, кДж/(кг·К) [3];  $Q_{1конц}, Q_{2конц}, Q_{3конц}$  – теплоти концентрування по корпусам, кВт;  $t_n$  – температура кипіння вихідного розчину при тиску в першому корпусі.

Оскільки  $Q_{3конц}$  складає значно менше 3% від  $Q_{3ор}$ , в рівняннях теплових балансів по корпусах нехтуємо величиною  $Q_{конц}$ .

Отримаємо систему рівнянь:

$$Q_1 = G_{en} \cdot 2243 \cdot 10^3 = 1,15[0,417 \cdot 3791(105,181 - 110,325) + w_1(2677 \cdot 10^3 - 105,181 \cdot 3791)]$$

$$Q_2 = w_1 \cdot 2243 \cdot 10^3 = 1,05[(0,417 - w_1)(3700 \cdot 95,258 - 3791 \cdot 105,181) + w_2(2652 \cdot 10^3 - 3700 \cdot 95,258)]$$

$$Q_3 = w_2 \cdot 2275 \cdot 10^3 = 1,05[(0,417 - w_1 - w_2)(3467 \cdot 86,329 - 3700 \cdot 95,258) + w_3(2293 \cdot 10^3 - 86,329 \cdot 3467)]$$

$$W = w_1 + w_2 + w_3,$$

Вирішення цієї системи рівнянь дає наступні результати

$$G_{en} = 1.063 \text{ кг/с}; \quad w_1 = 0,011 \text{ кг/с}; \quad w_2 = 0,109 \text{ кг/с};$$

$$w_3 = 0,123 \text{ кг/с}; \quad Q_1 = 266,917 \text{ кВт}; \quad Q_2 = 225,225 \text{ кВт}; \quad Q_3 = 249,437 \text{ кВт};$$

Найбільше відхилення розрахованих навантажень по воді, що випаровується в кожному корпусі від попередньо прийнятих ( $w_1 = 1,088 \text{ кг/с}$ ,  $w_2 = 1,196 \text{ кг/с}$ ,  $w_3 = 1,305 \text{ кг/с}$ ) не перевищує 5%, тому не будемо перераховувати концентрації і температури кипіння розчинів по корпусам.

### 2.1.5 Вибір конструкційного матеріалу

Вибираємо конструкційний матеріал, стійкий в середовищі киплячого розчину  $\text{KNO}_3$  в інтервалі зміни концентрацій від 20 до 50% [6]. В цих умовах хімічно стійкою буде сталь марки X18H10T. Швидкість корозії її не менше 0.1 мм/рік, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{cm} = 16.4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

### 2.1.6 Розрахунок коефіцієнтів теплопередачі

Коефіцієнт теплопередачі для першого корпусу визначають за рівнянням адитивності термічних опорів:

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum \delta/\lambda + 1/\alpha_2}.$$

Прийmemo, що сумарний термічний опір рівний термічному опору стінки  $\delta_{ct}/\lambda_{ct}$ , і накипу  $\delta_n/\lambda_n$ . Термічний опір забруднень зі сторони пари не враховуємо. Отримаємо:

$$\sum \delta/\lambda = 0.002/16,4 + 0.0005/3,05 = 2.86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

#### Властивості киплячого розчину

Корпус			
	1	2	3
Температура	105,181	89,23	86,329
Концентрація, %	13,11	19,952	46,33
Теплопровідність, Вт/(м*К)	0,613	0,59	0,58
Густина розчину кг/м <sup>3</sup>	1082	1143	1383
В'язкість, Па*с*10 <sup>-3</sup>	0,268	0,437	2,38
Теплоємність, Дж(К*кг)	3791	3700	3467
Поверхневий натяг, Н/м	0,069	0,0718	0,123
Теплота пароутворення, (Дж/кг)*10 <sup>3</sup>	2245	2286	2292
Густина пари, кг/м <sup>3</sup>	0,7036	0,4229	0,3531
Густина пари при p=10 <sup>5</sup> Па		0,5246	

Для розрахунку теплопередачі від пари до вертикальних труб знайдемо коефіцієнт А із графічної залежності(рис 1.1)

Температура	А×10 <sup>3</sup>
110,325	280
100,976	275
89,23	268

Розрахуємо коефіцієнт В, для визначення коефіцієнту тепловіддачі від стінок труб до киплячого розчину. Його знаходять з рівняння

$$\alpha = \frac{780\lambda^{1,3}\rho^{0,5}\rho_{\Pi}^{0,06}}{\sigma^{0,5}r^{0,6}\rho_{\Pi}^{0,66}c^{0,3}\mu^{0,3}} q^{0,6} = Bq^{0,6};$$

$\lambda$  - теплопровідність розчину;  $\rho$  – густина води;  $\rho_{\Pi}$  - густина пари;  $\mu$  – в'язкість;  $c$  – теплоємність;  $r$  – теплота пароутворення.

$$\frac{780\lambda^{1,3}\rho^{0,5}\rho_{\Pi}^{0,06}}{\sigma^{0,5}r^{0,6}\rho_{\Pi}^{0,66}c^{0,3}\mu^{0,3}}$$

Після підстановки всіх величин, отримаємо:  $B_1=11,881$ ;  $B_2=9,197$ ;  
 $B_3=4,759$

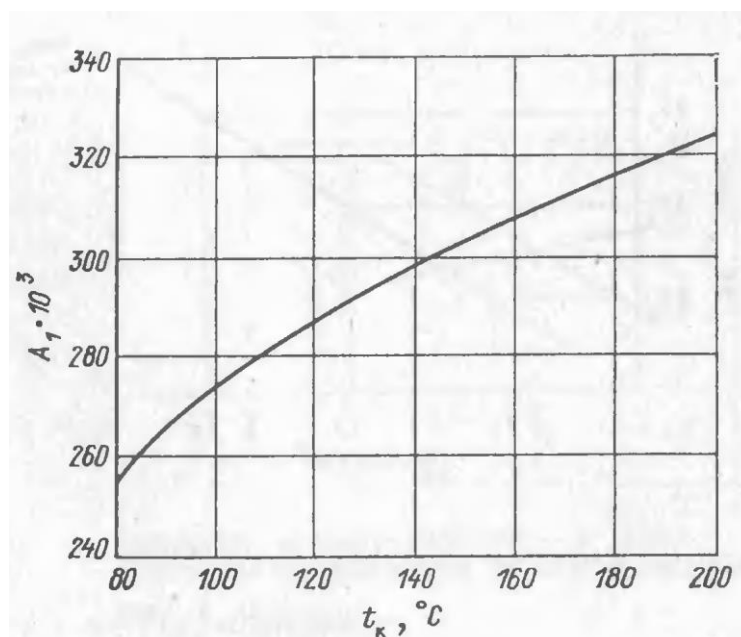


Рисунок 1.1 – Значення розрахункового коефіцієнта  $A$  для пари, що конденсується

Коефіцієнт тепловіддачі від пари що конденсується

Після розрахунку  $A$  та  $B$  задамося тепловими навантаженнями, так як вони розраховуються методом послідовних наближень і по результатах розрахунку будуються графік  $q-\Delta t_{\text{кор.}}$  (рис. 1.5).

Розрахунок коефіцієнтів теплопередачі і тепловіддачі.

	1 корпус		2 корпус		3 корпус	
$q, \text{Вт/м}^2$	2000	6000	5000	9000	1000	5000
$q^{-0.333}$	0,0796	0,0552	0,0586	0,0482	0,1	0,0586
$\alpha_1 = 0.63 \cdot A \cdot q^{-0.333}$	14041	9737	10152	8351	16884	9894
$q^{0.6}$	95,635	184,88	165,723	235,8	63,096	165,723
$\alpha_2 = B \cdot q^{0.6}$	1136	2197	1524	2169	300,27	788,7
$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum \delta/\lambda + 1/\alpha_2}$	808,28	1185	961	1154	272	604
$\Delta t = q/K$	2,47	5	5,2	7,8	3,7	8,3

За рисунком 1,3, для корисних різниць температур маємо:

$$\Delta t_1 = 5.144$$

$$q_1 = 6100 \text{ Вт/м}^2$$

$$K_1 = 1185.848 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$\Delta t_2 = 5.718$$

$$q_2 = 5700 \text{ Вт/м}^2$$

$$K_2 = 996.685 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$\Delta t_3 = 3.901$$

$$q_3 = 1300 \text{ Вт/м}^2$$

$$K_3 = 333.248 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

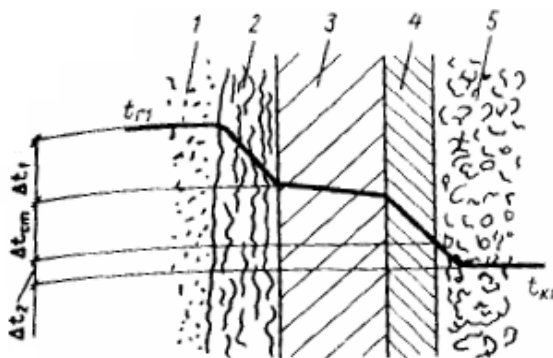


Рис. 1.2. Розподіл температур в процесі теплопередачі від пари до киплячого розчину через багатошарову стінку:

1 – пара; 2 – конденсат; 3 – стінка; 4 – накип; 5 – киплячий розчин.

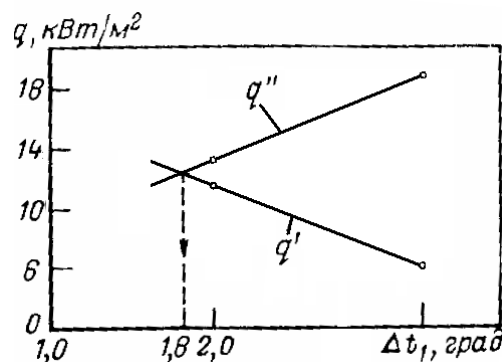


Рис. 1.3. Залежність питомого теплового навантаження  $q$  від різниці температур  $\Delta t_1$ .

### 2.1.7 Розподіл корисної різниці температур

Корисні різниці температур в корпусах установки знаходимо за умови рівності поверхнь теплопередачі:

$$\Delta t_{кор j} = \sum \Delta t_{кор} \frac{Q_j / K_j}{\sum_{j=1}^3 Q / K}.$$

де  $\Delta t_{кор j}$ ,  $Q_j$ ,  $K_j$  - відповідно корисна різниця температур, теплове навантаження, коефіцієнт теплопередачі для  $j$ -го корпуса.

Підставляючи чисельні значення, отримаємо:

$$\Delta t_{кор 1} = 14.763 \frac{266.917 / 1186}{266.917 / 1186 + 225.225 / 996.852 + 249.437 / 333.248} =$$

$$= 14.763 \frac{0.191}{0.191 + 0.226 + 0.749} = 14.763 \frac{0.191}{1.166} = 2.42 \text{ град};$$

$$\Delta t_{кор 2} = 14.763 (0.226 / 1.166) = 2.86 \text{ град};$$

$$\Delta t_{кор 3} = 14.763 (0.749 / 1.166) = 9.483 \text{ град}.$$

Перевіримо загальну корисну різницю температур установки:

$$\sum \Delta t_{кор} = \Delta t_{кор 1} + \Delta t_{кор 2} + \Delta t_{кор 3} = 2.28 + 2.42 + 9.483 = 14.763 \text{ град}.$$

Тепер розрахуємо поверхню теплопередачі випарних апаратів за формулою:

$$F = Q / (K \Delta t_k)$$

$$F_1 = 266.917 \cdot 10^3 / (1186 \cdot 2.42) = 93 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = 225225 / (996.852 \cdot 2.86) = 79 \text{ м}^2;$$

$$F_3 = 249437 / (333.248 \cdot 9.483) = 79 \text{ м}^2.$$

По ГОСТ 11987-81 [2] вибираємо випарний апарат з наступними характеристиками:

Номінальна поверхня теплообміну $F$	100 м <sup>2</sup>
Діаметр труб $d$	38×2 мм
Висота труб $H$	3000 мм
Діаметр граючої камери $d_k$	1000 мм
Діаметр сепаратора $d_c$	1800 мм
Діаметр циркуляційної труби $d_u$	700 мм
Загальна висота апарата $H_a$	11500 мм
Маса апарата $M_a$	6000

### 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

Товщину теплової ізоляції  $\delta_i$  знаходимо з рівності питомих теплових потоків через шар ізоляції від поверхні ізоляції в навколишнє середовище:

$$\alpha_n(t_{cm2} - t_n) = (\lambda_i / \delta_i)(t_{cm1} - t_{cm2}),$$

де  $\alpha_n = 9.3 + 0.058t_{cm2}$  - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляційного матеріалу в навколишнє середовище, Вт/(м<sup>2</sup>·К) [7];  $t_{cm2}$  - температура ізоляції з боку навколишнього середовища (повітря); для апаратів, що працюють в закритих приміщеннях,  $t_{cm2}$  вибирають в інтервалі 35-45 °С, прийmemo  $t_{cm2} = 40$  °С;  $t_{cm1}$  - температура ізоляції з боку апарата; із-за незначного термічного опору стінки апарата порівняно з термічним опором шаром ізоляції  $t_{cm1}$  приймають рівній температурі граючої пари  $t_{r1}$ ;  $t_n$  - температура навколишнього середовища (повітря), °С;  $\lambda_i$  - коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, Вт/(м·К).

Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі від корпусу до навколишнього середовища

$$\alpha_n = 9.3 + 0.058 \cdot 40 = 11.6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

В якості матеріалу для теплової ізоляції обираємо совеліт (85% магнезит + 15% азбесту). що має коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_i = 0.09$  Вт/(м·К). Розрахуємо товщину теплової ізоляції для першого корпусу) [8],

$$\delta_i = \frac{0.09(133.5 - 40)}{11.6(40 - 20)} = 0.036 \text{ м.}$$

Приймаємо товщину теплової ізоляції 0.055 м і для інших корпусів.



## 4. РОЗРАХУНОК БАРОМЕТРИЧНОГО КОНДЕНСАТОРА

Для створення вакууму в випарних установках зазвичай використовують конденсатори змішування з барометричною трубою. В якості охолоджуючого агента використовують воду, яка подається в конденсатор частіш за все при температурі навколишнього середовища (близько 20°C). Суміш охолоджуючої води і конденсату виливається з конденсатора по барометричній трубі. Для підтримання постійного вакууму в системі із конденсатора за допомогою вакуум-насоса відкачують неконденсовані гази.

Необхідно розрахувати видаток охолоджуючої води, основні розміри (діаметр і висоту) барометричного конденсатора і барометричної труби, продуктивність вакуум-насоса.

### 4.1 Видаток охолоджуючої води

Видаток охолоджуючої води  $G_6$  визначається з теплового балансу конденсатора:

$$G_6 = \frac{w_3(I_{\text{ок}} - c_6 t_k)}{c_6(t_k - t_n)},$$

де  $I_{\text{ок}}$  - ентальпія парів в барометричному конденсаторі, Дж/кг;  $t_n$  - початкова температура охолоджуючої води, °C;  $t_k$  - кінцева температура суміші води і конденсату, °C.

Різниця температур між парою і рідиною на виході із конденсатора повинна бути 3-5 град. Тому кінцеву температуру води  $t_k$  на виході із конденсатора прийmemo на 3 град нижче температури конденсації парів:

$$t_k = t_{\text{ок}} - 3.0 = 70 - 3.0 = 67 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тоді:

$$G_6 = \frac{0.119(2620000 - 70 * 3343)}{3343(70 - 40)} = 0.033 \text{ кг/с}.$$

## 4.2 Діаметр конденсатора

Діаметр барометричного конденсатора  $d_{\text{ок}}$  визначають з рівняння видатку:

$$d_{\text{ок}} = \sqrt{4w_3 / (\rho\pi v)},$$

де  $\rho$  - густина парів, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  - швидкість парів, м/с.

При залишковому тиску в конденсаторі порядку  $10^4$  Па швидкість парів  $v=15-25$  м/с. Тоді

$$d_{\text{ок}} = \sqrt{4 \cdot 0.119 / (0.198 \cdot 3.14 \cdot 20)} = 0.196 \text{ м.}$$

За нормлями НИИХИММАШа [9] підбираємо конденсатор діаметром, рівний розрахунковому або найближчий більшому. Визначаємо його основні розміри. Обираємо барометричний конденсатор діаметром  $d_{\text{ок}} = 500$  мм.

## 4.3 Висота барометричної труби

У відповідності до нормалей [9], внутрішній діаметр барометричної труби  $d_{\text{от}}$  рівний 250 мм. Швидкість води в барометричній трубі

$$v = \frac{4(G_{\text{с}} + w_3)}{\rho\pi d_{\text{от}}^2} = \frac{4(0.417 + 0.119)}{1000 \cdot 3.14 \cdot 0.25^2} = 0.011 \text{ м/с.}$$

Висота барометричної труби

$$H_{\text{от}} = \frac{B}{\rho_{\text{с}} g} + \left(1 + \sum \xi + \lambda \frac{H_{\text{от}}}{d_{\text{от}}}\right) \frac{v_{\text{с}}^2}{2g} + 0.5,$$

де  $B$  – вакуум в барометричному конденсаторі, Па;  $\sum \xi$  - сума коефіцієнтів місцевих опорів;  $\lambda$  - коефіцієнт тертя в барометричній трубі; 0.5 – запас висоти на можливу зміну барометричного тиску, м.

$$B = P_{\text{атм}} - P_{\text{ок}} = 10.13 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4 = 7.13 \cdot 10^4 \text{ Па;}$$

$$\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вих}} = 0.5 + 1.0 = 1.5,$$

де  $\xi_{\text{вх}}, \xi_{\text{вих}}$  - коефіцієнти місцевих опорів на вході в трубу і на виході з неї.

Коефіцієнт тертя  $\lambda$  залежить від режиму руху рідини. Визначимо режим руху води в барометричній трубі:

$$\text{Re} = \nu_{\text{е}} d_{\text{ом}} \rho_{\text{е}} / \mu_{\text{е}} = 0.011 \cdot 0.25 \cdot 1000 / (0.54 \cdot 10^{-3}) = 5902.$$

Для гладких труб при  $\text{Re} = 5902$  коефіцієнт тертя  $\lambda = 0.735$  [1].

Підставивши в рівняння для висоти барометричної труби вказані значення, отримаємо:

$$H_{\text{ом}} = \frac{7.13 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9.8} + \left( 1 + 1.5 + 0.735 \frac{H_{\text{ом}}}{0.25} \right) \frac{\nu_{\text{е}}^2}{2g} + 0.5.$$

Звідси знаходимо  $H_{\text{ом}} = 7.8$  м

## 5.ВИСНОВК

В результаті розрахунків згідно до завдання було підібрано випарний апарат (тип 1, виконання 2).

### 5.1 Технічні характеристики апарата (згідно ГОСТ 11987-81)

Номінальна поверхня теплообміну $F$	100 м <sup>2</sup>
Діаметр труб $d$	38×2 мм
Висота труб $H$	3000 мм
Діаметр граючої камери $d_{\kappa}$	1000 мм
Діаметр сепаратора $d_c$	1800 мм
Діаметр циркуляційної труби $d_{\text{ц}}$	700 мм
Загальна висота апарата $H_a$	11500 мм
Маса апарата $M_a$	6000 кг

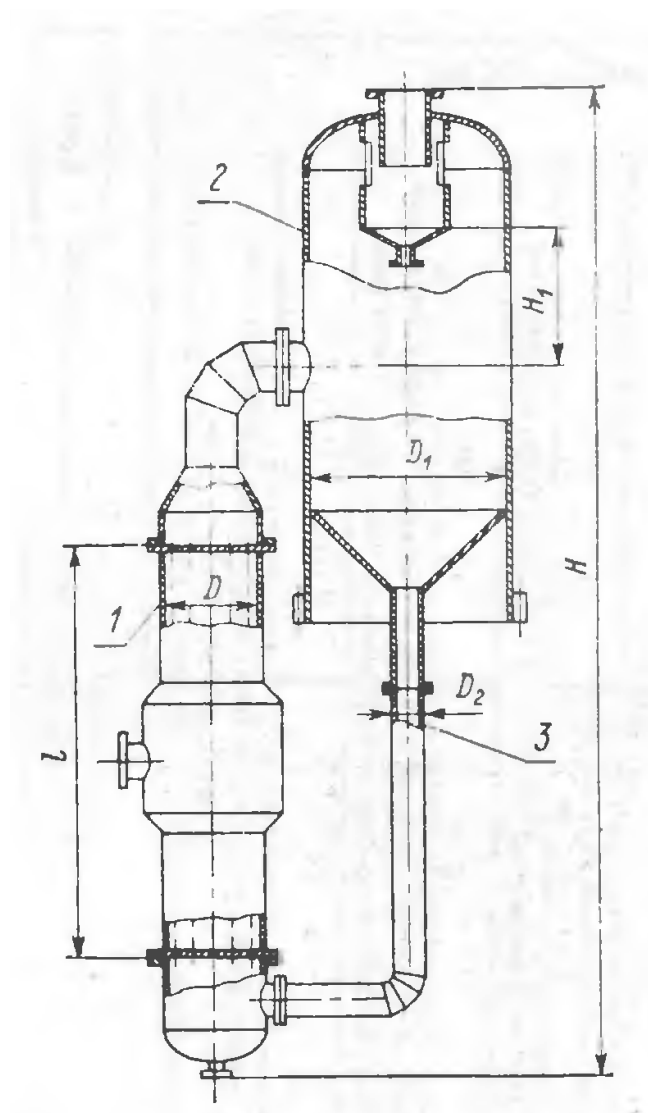
Схема апарата наведена на рис. 6.1.

### 5.2 Технічні характеристики барометричного конденсатора

Внутрішній діаметр конденсатора $d_{\text{ок}}$ , мм	500	Відстань між полицями $a_1$	220
Товщина стінки апарата $S$	5	$a_2$	260
Відстань від верхньої полиці	1300	$a_3$	320
апарата до кришки $a$		$a_4$	360
Відстань від нижньої кришки	1200	$a_5$	390
апарата до дна $r$		Умовні проходи штуцерів:	
Ширина полиці $b$	-	для входу пари (А)	

			00
Відстань між вісями		Для входу рідини (Б)	
конденсатора і ловушки:			00
		Для виходу парогазової суміші	
		(В)	0
$K_1$	625	Для барометричної труби (Г)	
			25
$K_2$	-	Повітряник (С)	
Висота установки $H$	4300	Для входу парогазової суміші	
		(И)	0
Ширина установки $T$	1300	Для виходу парогазової суміші	
		(Ж)	0
Діаметр ловушки $D$	400	Для барометричної труби (Е)	
			0
Висота ловушки $h$	1440		
Діаметр ловушки $D_1$	-		

## 6. Схема випарного апарата



1 – гріюча камера; 2 – сепаратор; 3 – розподіляюча камера;

$D$  – діаметр гріючої камери;  $D_1$  – діаметр сепаратора;  $D_2$  – діаметр циркуляційної труби;  $H$  – висота апарата;  $H_1$  – висота парового простору;

$l$  – довжина труби.

**Рисунок 6.1 – Схема випарного апарата з співвісною гріючою камерою 1 (тип 1 виконання 2):**

## 7. Список використаної літератури

1. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л.: Химия, 1976. 552 с.
2. ГОСТ 11987-81. Аппараты выпарные трубчатые.
3. Справочник химика. М.-Л.: Химия, Т. III, 1962. 1006 с. Т. V, 1966. 974 с.
4. Каталог УКРНИИМАШа. Выпарные аппараты вертикальные трубчатые общего назначения. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1979. 38 с.
5. Мищенко К.П., Полторацкий Г.М. Термодинамика и строение водных и неводных растворов электролитов. Изд. 2-е. Л.: Химия, 1976. 328 с.
6. Виноградов Ю.М. Износостойкие материалы в химическом машиностроении. Справочник. Л.: Машиностроение, 1977. 256 с.
7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. 9-е. М.: Химия, 1973. 750с.
8. Теплотехнический справочник. Т. 2. М.: Энергия, 1972. 896 с.
9. ГОСТ 26716-76. Барометрические конденсаторы.

**Додаток Е Алгоритм виконання розрахункової роботи на тему  
«Барабанна сушарка для сушіння нітрату амонію»**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-хімічний факультет**

**Кафедра машин і апаратів хімічного виробництва**

**Розрахункова робота**

**з курсу «Технологічні об'єкти управління: Теоретичні основи  
функціонування об'єктів управління»**

**на тему:**

**Барабанна сушарка для сушіння нітрату амонію**

**Варіант №13**

Виконав студент групи ХЕ-91 \_\_\_\_\_ Л.Л. Товкач  
(підпис, дата)

Керівник роботи, доц. \_\_\_\_\_ М.П. Швед  
(підпис, дата)

**Київ 2019**



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-хімічний факультет**

**Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**ЗАВДАННЯ**

**до розрахункової роботи**

студентові групи ХЕ- \_\_Товкач М.М..\_\_\_\_\_

1.Тема проекту: Барабанна сушарка для сушіння нітрату амонію

2.Термін здачі студентом закінченого проекту: 10 грудня 2012р.

3.Вихідні дані до проекту: Розрахувати барабанну сушарку з підйимально-лопатевою насадкою для сушіння нітрату амонію у межах міста Одеса.

Масова продуктивність сушарки 1 кг/с.

Відносна вологість матеріалу: початкова 4 %, а кінцева 0,3.

Сушильний агент повітря.

Схема руху сушильного агента, та висушувального матеріалу - протитечійна.

Розрахунок здійснити для літніх та зимніх умов.

Літня температура Одеси становить  $21,4^{\circ}\text{C}$ , вологість 66%.

Зимня температура Одеси становить  $-2^{\circ}\text{C}$ , вологість 84%.

4.Перелік питань, які мають бути розроблені: 1) Вступ, 2) Класифікація та опис відповідного теплотехнічного обладнання, 3) Вибір типу апарата та обґрунтування його конструкції, 3) Вибір і характеристика теплоносіїв, 4) Вибір матеріалів апарата, 5) Технічні вимоги до апарату, 6) Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції, 7) Висновки, 8) Перелік посилань.

5.Перелік графічного (ілюстрованого) матеріалу: Розрахункові схеми та схематичне зображення апарату.

6.Дата видачі завдання: „\_\_” \_\_\_\_\_ 2012\_\_р.

Завдання прийняв до виконання студент

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Керівник розрахункової роботи, доцент Швед М.П.

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

## Зміст

Вступ

Завдання

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів

1. Методи сушіння
2. Класифікація сушарок
3. Опис і обґрунтування обраної конструкції
4. Розрахунок основних параметрів сушильної камери

Висновки

Технічні характеристики апарата

Технічні характеристики барометричного конденсатора

Схема апарата

					ХЕ71.066639.001 ПЗ									
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата										
Разроб.		Заїка			Барабанна сушарка для сушіння нітрату амонію				Літ.		Лист	Листів		
Перев.		Степанюк									9	285		
Н.Контр.		Михайчук							КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО, ІХФ, МАХНВ					
Затв.														

## Вступ

Видалення вологи з твердих і пастоподібних матеріалів здешевлює їх транспортування і надає їм певні властивості, а також зменшенню корозії апаратури. Вологу можна видаляти механічним способом: віджимання, центрифугування, відстоювання. Проте цими способами волога видаляється частково, більш ретельніше видалення вологи здійснюється шляхом теплової сушки: випаровування вологи, видалення пари.

Процес теплової сушки може бути природним і штучним. Природна сушка застосовується рідко. По фізичній суті сушка є складним дифузійним процесом. Його швидкість визначається швидкістю дифузії вологи з глибинних частин матеріалу до поверхні, а потім в навколишнє середовище. Видалення вологи при сушці включає не тільки перенесення матеріалу, але й перенесення теплоти. Таким чином сушіння - це тепломасообмінний процес.

Метою сушіння є поліпшення якості матеріалу (зниження його об'ємної маси, підвищення міцності) і, у зв'язку з цим, збільшення можливостей його використання. У хімічній промисловості, де технологічні процеси протікають в основному в рідкій фазі, кінцеві продукти мають вигляд або паст, або зерен, крихти, пилу. Це обумовлює вибір відповідних методів сушіння. У даній розрахунковій роботі розраховується параметри барабанної сушарки.

					XE71.066639.001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1. Методи сушіння

Найбільш поширені в хімічній технології конвективний і контактний методи сушіння. При конвективній сушці тепло передається від теплоносія до поверхні висушуваного матеріалу. Як теплоносії використовують повітря, інертні і димові гази. При контактній сушці тепло висушуваному матеріалу передається через перегородку, що обігрівається, дотичну з матеріалом. Дещо рідше застосовують радіаційну сушку (інфрачервоними променями) і сушку електричним струмом (високої або промислової частоти). Методи сушки сублімацією, в рідких середовищах, із скиданням тиски знаходять вживання в інших галузях промисловості.

При конвективній сушці фізична суть процесу зводиться до видалення вологи з матеріалу за рахунок різниці парціальних тисків пари над матеріалом  $p^m_c$  і в довкіллі  $p^c_n$ . Сушка відбувається за умови, що  $p^m_c > p^c_n$ . При рівності парціальних тисків  $p^m_c = p^c_n$  настає стан рівноваги, і процес сушки припиняється. При цьому в матеріалі встановиться вологість, звана рівноважною  $\omega_p$ . Якщо сушити матеріал до вологості нижче рівноважною, то неминуче настане стан, при якому  $p^m_c < p^c_n$ , і матеріал почне зволожуватися. Цей процес називають сорбцією. Зазвичай сушіння ведуть до рівноважної вологості.

При сушінні видалення вологи з поверхні пов'язане з дифузією вологи зсередини матеріалу до поверхні. Ці два процеси повинні знаходитися в строгій відповідності; інакше можливе пересихання, викривлення поверхні матеріалу і погіршення якості останнього.

Процес сушки характеризується двома періодами: постійній швидкості і падаючій швидкості.

У першому періоді віддається поверхнева волога матеріалу. При цьому все тепло витрачається лише на випарювання вологи. Температура матеріалу в цей період постійна і дорівнює температурі мокрого термометра психрометра. Після досягнення критичної вологості шкр починається другий період сушки, коли віддається волога, що підійшла до поверхні за рахунок дифузії внутрішніх шарів. Температура матеріалу поступово зростає і в кінці сушки

наближається до температури теплоносія. Цей період триває до досягнення рівноважної вологості.

Таким чином, при конвективній сушці волога переміщається до поверхні за рахунок градієнта вологості, а градієнт температури декілька гальмує процес. За рахунок різниці температур на поверхні і усередині матеріалу відбувається рух вологи всередину, у напрямі зниження температури.

При сушці в полі високої частоти матеріал зсередини має вищу температуру, ніж на поверхні; останнє інтенсифікує процес сушки, оскільки градієнти дифузії і термодифузії направлені в один бік.

При контактній сушці термодифузія і дифузія за рахунок різниці концентрації вологи однаково направлені, що сприяє деякій інтенсифікації процесу в першому періоді сушки. У другому періоді різниця температур зменшується, тому декілька знижується інтенсивність сушки.

При сушці інфрачервоними променями напрямку потоку вологи (градієнт вологовмісту і потоку тепла) протилежні, що декілька знижує швидкість сушки в перший момент. При поступовому прогріванні тіла волога переміщується в середину шару матеріалу, вологовміст віддалених від поверхні шарів зростає і виникає значний перепад вологовмісту в тілі. До кінця періоду опромінення тіло прогрівається, волога рухається до поверхні і починає інтенсивно випаровуватися. Інтенсивність випару підвищується в десятки разів.

Таким чином, при сушці різних матеріалів слід вибирати метод сушки і конструкцію сушарки відповідно до технічних умов при висушуванні.

## 2. Класифікація сушарок

В хімічній промисловості види сушарок можна класифікувати по технологічних ознаках: тиску (атмосферні і вакуумні), періодичністю процесу, способом підведення тепла ( конвективне, контактне, радіаційне, з нагрівом струму високої частоти), роду сушильного агента ( повітряні, газові, сушарки на перегрітій парі), направленням руху матеріалу і сушильного агента (прямоточні і протиточні), способом обслуговування, схемі циркуляції сушильного агента, тепловій схемі і так далі. Вибір типу сушарки залежить від хімічних властивостей матеріалу. Конструкції сушарок дуже різноманітні і вибір їх визначається технологічними особливостями виробництва. Найбільш широкого поширення набули конструкції, що приведені нижче.. Ці сушарки відрізняються високою продуктивністю і відносяться до конвективних сушарок. В якості сушильного агенту в них використовують повітря і димові гази. У цих апаратах сушінню піддають солі, паливо, пасти; їх також використовують у виробництвах соди, добрив, отрутохімікатів і т.п.

### Камерна сушка

**Призначення.** Використовуються на виробництві малого масштабу для матеріалів, що допускають невисоку температуру сушіння, наприклад фарбників (Рисунок 3.1).

**Принцип дії.** Матеріал в цих сушках сушиться на лотках (деках), що встановлені на стелажах чи вагонетках, що знаходяться всередині сушильної камери 1. На каркасі між вагонетками 2 встановлені козирки 3, які як би ділять простір камери на три розміщені одна в одній зоні, вздовж яких послідовно рухається сушильний агент. Свіже повітря, нагріте в зовнішньому калорифері 4, засмоктується вентилятором 5 і подається вниз камери сушарки. Тут він рухається (рух повітря зображено стрілками), двічі змінюючи напрям і двічі нагріваючись в проміжних калориферах 6 і 7. Частина відпрацьованого повітря за допомогою шибера 8 направляється на змішування зі свіжим. Таким чином, сушарка працює з проміжним підігрівом і частковою рециркуляцією повітря,

тобто по варіанту, що забезпечує низьку температуру і більш м'які умови сушіння.

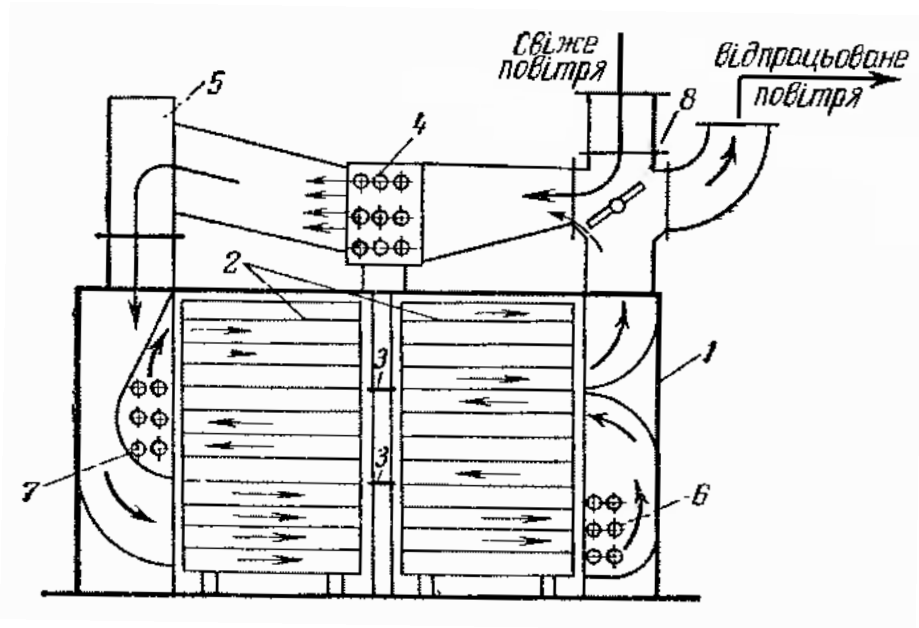


Рисунок 3.1 – Камерна сушка

4, 6, 7 – калорифери; 5 – вентилятор; 8 – шибер.

**Переваги.** Сушарка малогабаритна, може використовуватись на малих підприємствах. Простота конструкції. М'який режим сушіння, низька температура.

**Недоліки.** Періодична дія. Внаслідок сушіння в нерухомому товстому шарі, сушарки цього типу мають низьку продуктивність і тривалість сушіння в них велика. Крім того сушіння в них нерівномірне із-за нерівномірності температур в камері., що виникає внаслідок часткового проходу повітря в вище розміщені зони найкоротшим шляхом (крізь зазори). Обслуговування потребує великих затрат ручної праці.

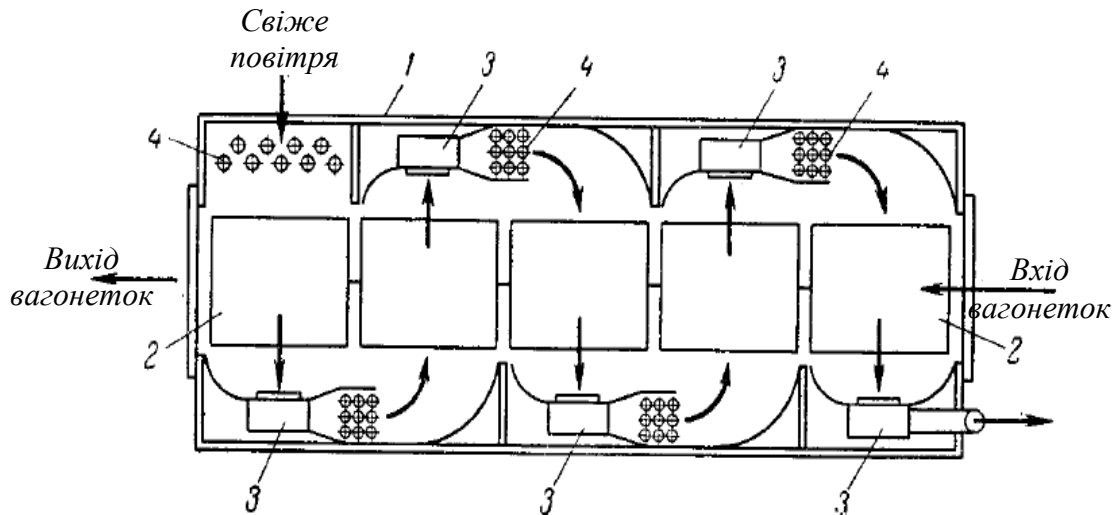
### Тунельна сушарка

**Призначення.** Використовуються для сушіння великої кількості штучних матеріалів, наприклад керамічних виробів (Рисунок 3.2).

**Принцип дії.** З'єднані між собою вагонетки поступово пересуваються на рейках вздовж дуже довгої камери прямокутного перерізу – (коридору). На

вході і виході коридор має герметичні двері, які одночасно періодично відчиняються для завантаження і вивантаження матеріалу: вагонетка з висушеним матеріалом видаляється з камери, а з іншого боку в неї надходить нова вагонетка з вологим матеріалом. Переміщення вагонеток проводиться за допомогою троса і механічної лебідки. Сушильний агент рухається прямо током або протитоком до матеріалу, що висушується.

**Переваги.** Рівномірний режим сушіння. Безперервність дії.



1 – камера; 2 – вагонетки; 3 – вентилятори; 4 – калорифери

Рисунок 3.2 – Тунельна сушарка

**Недоліки.** Низька продуктивність і тривалість сушіння. Довга і нерівномірна сушка. Обслуговування потребує великих затрат ручної праці.

### Стрічкова сушарка

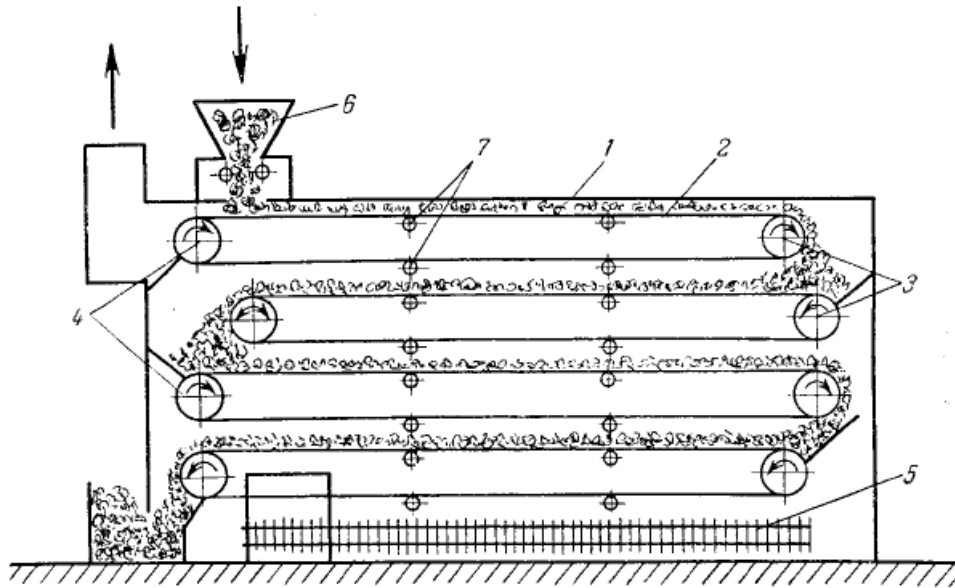
**Призначення.** Для висушування матеріалів (Рисунок 3.3).

**Принцип дії.** В цих сушарках сушіння матеріалів проводиться безперервно при атмосферному тиску. В камері 1 сушарки шар матеріалу, що висушується рухається на нескінченній стрічці 2, натягнутій між ведучим 3 і відомим 4 барабанами. Вологий матеріал подається на один кінець стрічки, а підсушений видаляється з іншого боку. Сушка виконується гарячим повітрям



або пічними газами, які рухаються протитоком або перехресним током по напрямку до руху матеріалу.

**Переваги.** При пересипанні матеріалу зі стрічки на стрічку збільшується поверхня його дотикання з сушильним агентом, що сприяє зростанню швидкості і рівномірності сушіння. Стрічкові сушарки можуть працювати по різним варіантам сушильного процесу.



1 – камера сушарки; 2 – нескінченна стрічка; 3 – ведучі бабрабани; 4 – відомі барабани; 5 – калорифер; 6 – живильник; 7 – опірні ролики

.Рисунок 3.3 – Стрічкова сушарка:

**Недоліки.** Стрічкові сушарки громіздкі складні в обслуговуванні головним чином із-за перекосів і розтягів стрічок. Їх питома продуктивність (на  $1 \text{ м}^2$  стрічки) невелика, а питомі витрати тепла (на 1 кг випареної вологи) досить високі. Крім того, вони непридатні для сушіння пастоподібних матеріалів.

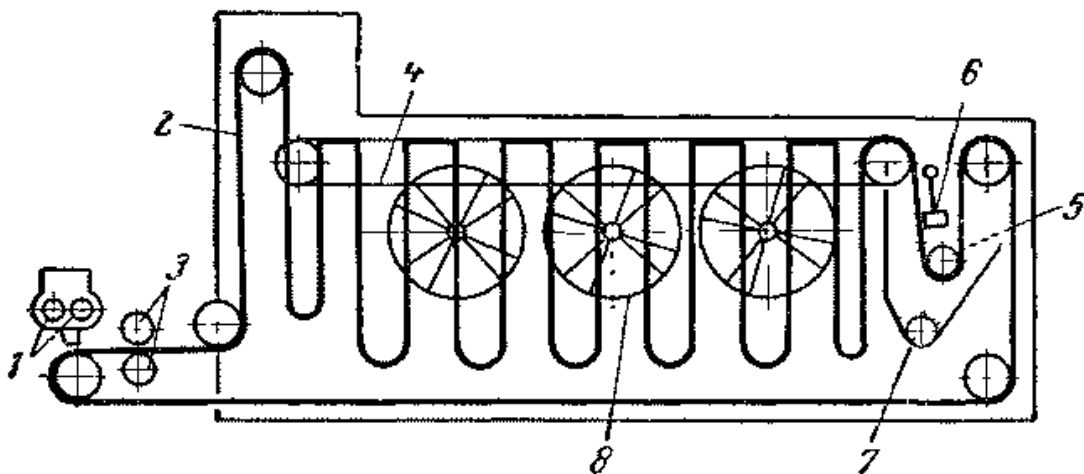
### Петлева сушарка

**Призначення.** Сушіння пастоподібних матеріалів, а також тонких листових (наприклад паперу) (Рисунок 3.4).

**Принцип дії.** Безперервно діюча сушарка, що працює під атмосферним тиском. В сушарці для паст живильник 1 подає матеріал на нескінченну гнучку сітчасту стрічку 2, яка проходить між вальцями 3, що обігріваються парою, що вдавлюють пасту всередину комірок стрічки.

Стрічка з впресованим матеріалом потрапляє в сушильну камеру, де утворює петлі. Це досягається за допомогою шарнірно з'єднаних ланок стрічки і розташованих на ній через певні проміжки поперечних рейок, що спираються на ланцюговий конвеєр 4. За допомогою направляючого ролика 5 стрічка відводиться до автоматичного ударного пристрою 6, за допомогою якого висушений матеріал скидається зі стрічки і виводиться із сушарки розвантажувальним шнеком 7.

Циркуляція повітря (або газів) виконується за допомогою осевих вентиляторів 8, частина яких (з одного боку камери) зображена на рис., причому гаряче повітря чи газ рухається поперек стрічки 2. Сушарка зазвичай працює по варіанту з проміжним підігрівом повітря і частковою рециркуляцією його по зонам.



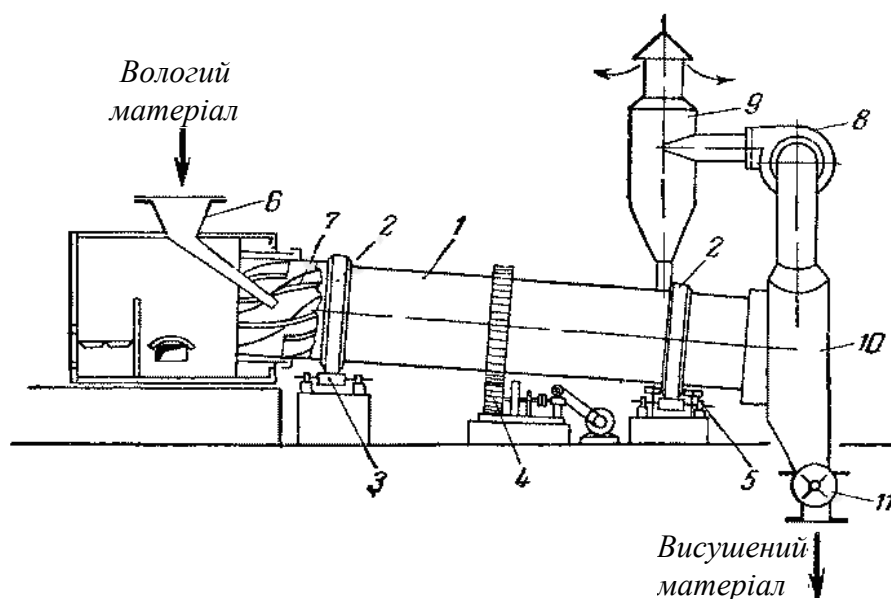
1 – живильник; 2 – нескінченна сітчаста стрічка; 3 – притискні вальці; 4 – ланцюговий конвеєр; 5 – направляючий ролик; 6 – автоматичний ударний пристрій; 7 – розвантажувальний шнек; 8 – вентилятор

Рисунок 3.4 – Петлева сушарка:

**Переваги.** Сушіння проводиться в шарі невеликої товщини (рівній товщині ланок стрічки, що складають 5-20 мм) при двосторонньому омиванні стрічки гарячим повітрям і прогріві запресованого матеріалу металічним каркасом (сіткою), нагрітим вальцями 3. Це забезпечує велику швидкість сушіння.

**Недоліки.** Складність конструкції. Значні експлуатаційні затрати.

### Барабанна сушарка



1 – барабан; 2 – бандажі; 3 – опірні ролики; 4 – передача; 5 – опірно-упорні ролики; 6 – живильник; 7 – лопаті; 8 – вентилятор; 9 – циклон; 10 – розвантажувальна камера; 11 – розвантажувальний пристрій.

Рисунок 3.5 – Барабанна сушарка

**Призначення.** Для безперервного сушіння при атмосферному тиску кускових, зернистих і сипучих матеріалів (мінеральних солей, фосфоритів і ін.) (Рисунок 3.5)

**Принцип дії.** Сушарка має циліндричний барабан 1, встановлений з невеликим нахилом до горизонту ( $1/15 - 1/50$ ), який спирається за допомогою бандажів 2 на ролики 3. Барабан приводиться в обертання електродвигуном

через зубчасту передачу 4 і редуктор. Число обертів барабану зазвичай не перевищує  $5-8 \text{ хв}^{-1}$ ; його положення в осьовому напрямку фіксується упорними роликами 5. Матеріал подається в барабан живильником 6, попередньо підсушується, перемішується лопатнями 7 приймально-гвинтової насадки, а потім подається на внутрішню насадку, розташовану вздовж майже всієї довжини барабану. Насадка забезпечує рівномірний розподіл і хороше перемішування матеріалу по перерізу барабана, а також його тісний контакт при пересипанні з сушильним агентом – пічними газами. Гази і матеріал особливо часто рухаються прямою, що допомагає запобігти перегріву матеріалу, так як в цьому випадку найбільш гарячі гази дотикаються до матеріалу, що має найбільшу вологість. Щоб запобігти підсиленого виносу пилу з газами останні просмоктуються крізь барабан вентилятором 8 з середньою швидкістю, що не перевищує 2-3 м/с. Перед викидом в атмосферу відпрацьовані гази очищують від пилу у циклоні 9. На кінцях барабану часто встановлюють ущільнюючі прилади (наприклад лабіринтні), що ускладнюють витіки сушильного агенту.

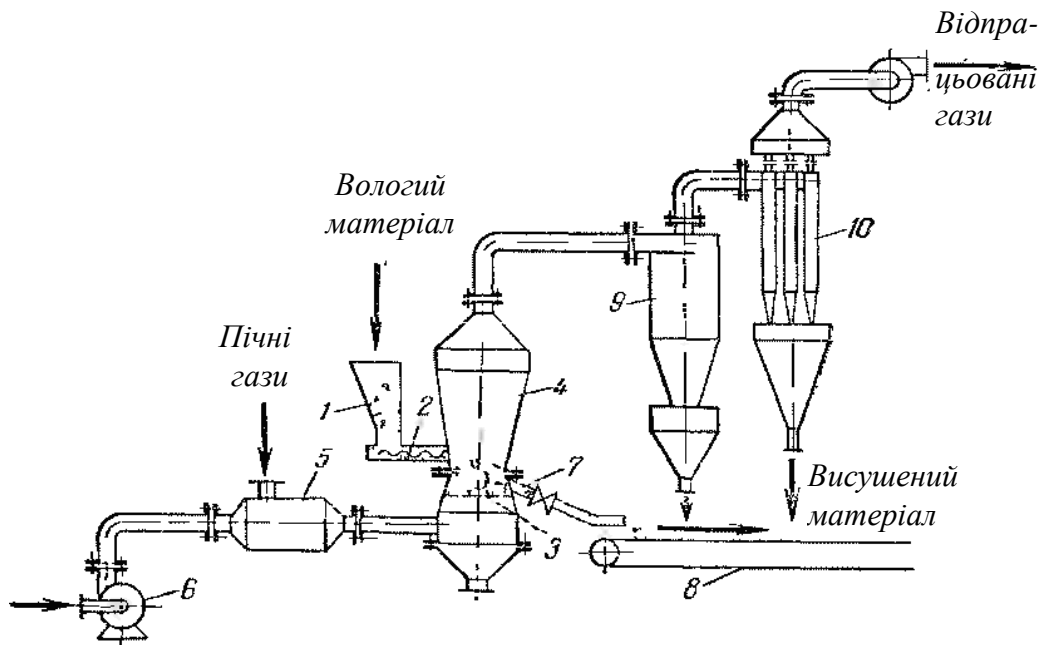
Біля розвантажувального кінця барабану є підпирний пристрій у вигляді суцільного кільця або кільця, утвореного кільцеподібно розміщеними поворотними лопатками (у вигляді жалюзі). Призначення цього кільця – підтримувати певну ступінь заповнення барабану матеріалом; як правило, ступінь заповнення не перевищує 20%. Час перебування зазвичай регулюється часом обертання барабану і рідше – зміною кута його нахилу. Висушений матеріал видаляється з камери 10 крізь розвантажувальний пристрій 11, за допомогою якого герметизується камера 10 і попереджається потрапляння в неї повітря ззовні. Якби повітря потрапило в камеру, це призвело б до некорисному збільшенню продуктивності і енергії, що споживається вентилятором 8.

**Переваги.** Рівномірний безперервний режим сушіння.

**Недоліки.** Складність конструкції та чистки.

## Сушарка з киплячим шаром

**Призначення:** В хімічній технології не лише для сушіння сильно сипучих зернистих матеріалів (наприклад мінеральних і органічних солей), але і матеріалів, що схильні до кумкання, наприклад для сульфату амонію, а також пастоподібних матеріалів, розчинів, розплавів, суспензій (Рисунок 3.6).



1 – бункер; 2 – живильник; 3 – газорозподільча решітка; 4 – камера сушарки; 5 – змішувальна камера; 6 – вентилятор; 7 – штуцер для вивантаження висушеного матеріалу; 8 – транспортер; 9 – циклон; 10 – батарейний пилевловлювач.

Рисунок 3.6 – Однокамерна сушарка з киплячим шаром:

**Принцип дії:** Матеріал, що висушується, подається з бункера 1 живильником 2 в шар матеріалу, «киплячого» на газорозподільчій решітці 3 в камері 4 сушарки. Сушильний агент – гаряче повітря або пічні гази, розбавлені повітрям, який подається у змішувальну камеру 5 вентилятором 6, - проходить з заданою швидкістю крізь отвори решітки 3 і підтримує на ній матеріал в киплячому (псевдозрідженому) стані. Висушений матеріал висипається крізь штуцер 7 дещо вище ґратки 3 і видаляється транспортером 8. Відпрацьовані

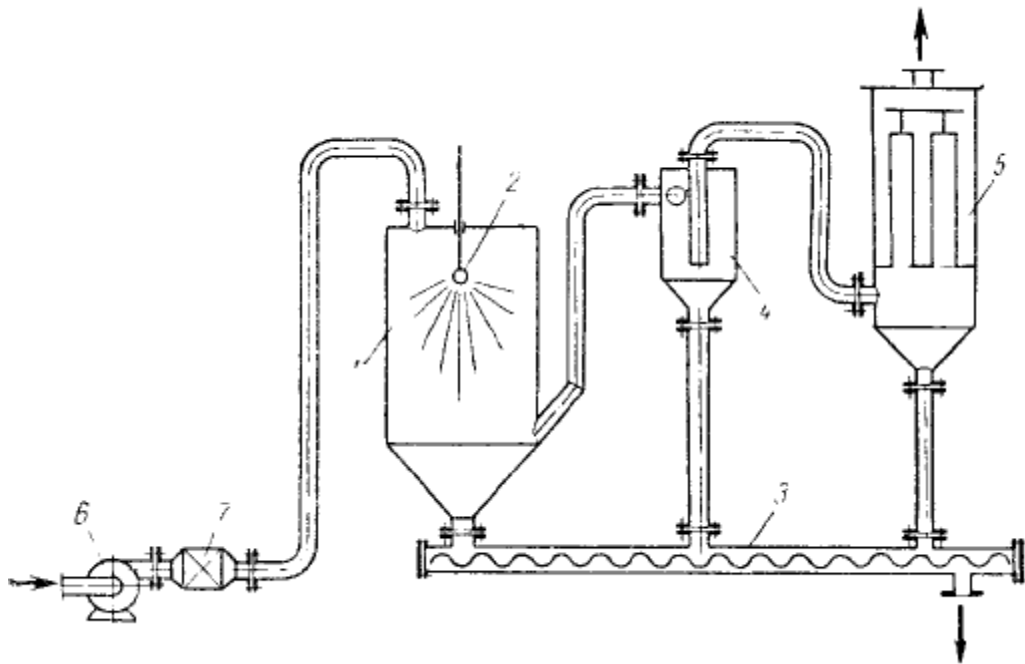
гази очищуються від внесеного пилю в циклоні 9 і батарейному пиловловлювачі 10, після чого викидаються в атмосферу.

**Переваги.** Рівномірний та швидкий режим сушки. Матеріал з усіх боків контактує з сушильним агентом.

**Недоліки.** Складність конструкції та очистки. Можливість забиття фільтрів пилом.

### Розпилююча сушарка

**Призначення:** Використовується для сушіння в'язких рідин та речовин, що не містять твердих часток, так як форсунки чутливі до забруднення (Рисунок 3.7).



1 – камера сушки; 2 – форсунка; 3 – шнек для розвантаження висушеного матеріалу; 4 – циклон; 5 – рукавний фільтр; 6 – вентилятор; 7 – калорифер.

Рисунок 3.7 – Розпилююча сушарка:

**Принцип дії:** Матеріал подається в камеру 1 через форсунку 2. Сушильний агент рухається паралельним потоком з матеріалом. Дрібні тверді

частки висушеного матеріалу осідають на дно камери і відводяться шнеком 3. Відпрацьований сушильний агент після очистки від пилу в циклоні 4 і рукавному фільтрі 5 викидається в атмосферу.

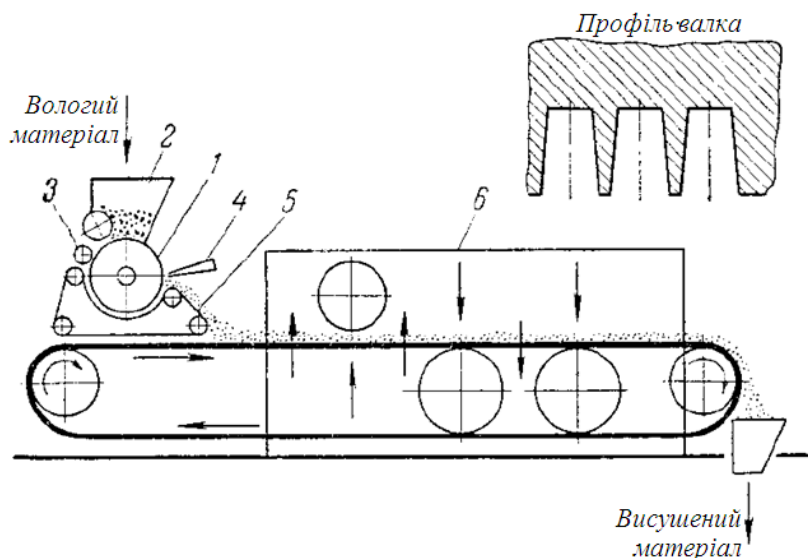
Розпилюючі сушарки працюють по принципу протитечії і змішаного току. Але протитечія особливо розповсюджена, так як дозволяє проводити сушіння при високих температурах без перегріву матеріалу.

**Переваги:** Висока інтенсивність випаровування вологи за рахунок розпилення матеріалу що висушує в сушильній камері. Велика швидкість процесу при м'яких температурних умовах, що дозволяє отримати якісний порошковидний продукт, що добре розчиняється і не вимагає подальшого подрібнення.

**Недоліки:** Громіздкість апарату. Складність конструкції. Неоднорідність розпилення.

### Одновалкова формуюча сушарка

**Призначення:** Використовується для сушіння густих матеріалів (Рисунок 3.8).



1 – формуючий барабан; 2 – завантажувальна борінка; 3 – притискний валик; 4 – гребінчатий ніж; 5 – транспортер; 6 – стрічкова сушарка

Рисунок 3.8 – Одновалкова формуюча сушарка

**Принцип дії:** Барабан (валок) 1 сушки має рихлу поверхню з кільцевими канавками глибиною 6-10 мм. Паста із завантажувальної борінки 2 вмащується в канавки за допомогою притискного валика 3. За один оберт барабану в його канавках утворюється відформовані палички пористої структури, які легко виламуються невеликими шматочками під дією гребінчастого ножа 4. Досушування матеріалу проводиться в барабанній або стрічковій сушці, в яку палички відформованого матеріалу подаються по транспортній стрічці 5. Такі комбіновані сушарки називаються відповідно валково-барабанними або валково-стрічковими.

**Переваги:** Значна якість сушіння, за рахунок поєднання двох конструкцій. Безперервна дія. Не потребують ручного обслуговування.

**Недоліки:** Складність конструкції. Дана сушка вимагає значних енерговитрат.

### **Барабанна контактна сушарка**

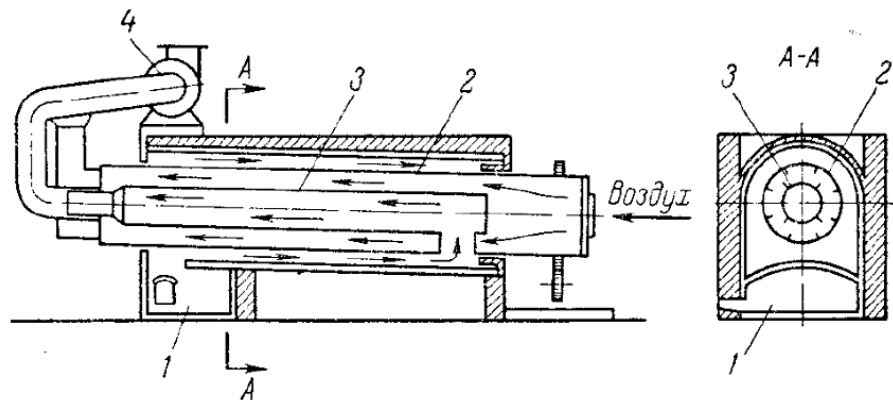
**Призначення:** Барабанна контактна сушарка використовується в тих випадках, коли для уникнення забруднення матеріалу, що висушується, не допускається його контакт з пічними газами (Рисунок 3.9).

**Принцип дії:** В барабанній контактній сушарці з передачею тепла через стінку, пічні гази, отримані в печі 1, омивають барабан 2 ззовні, а потім проходять через внутрішній циліндр 3 і відсмоктуються вентилятором 4. Матеріал, що висушується, рухається зліва направо по кільцевому простору між стінками барабану 2 і циліндра 3.

**Переваги:** Простота конструкції. Можливість сушити матеріали, контакт яких з пічними газами недопустимий.

**Недоліки:** Малий коефіцієнт теплопередачі від газів до матеріалу через стінку.





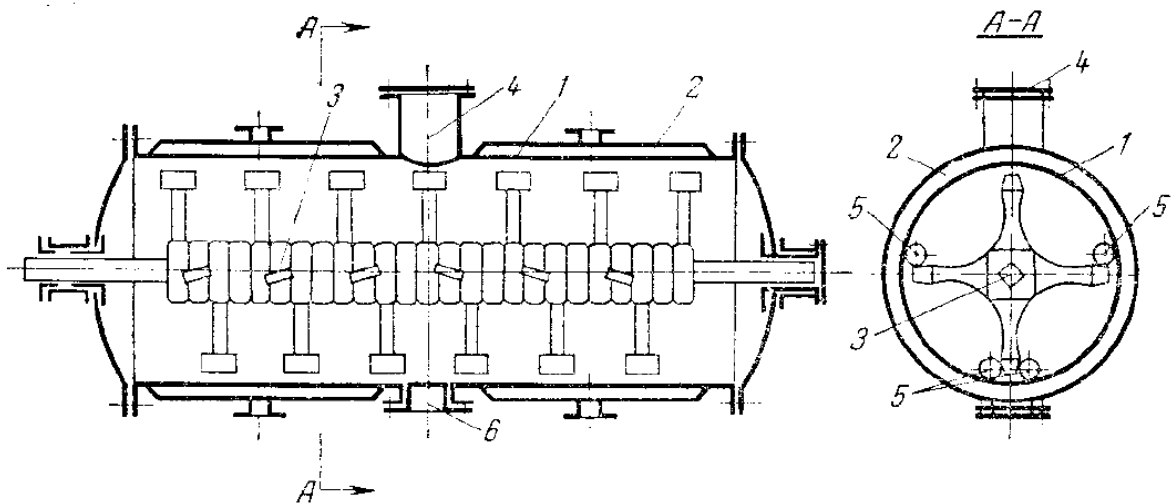
1 – піч; 2 – барабан; 3 – внутрішній циліндр; 4 – вентилятор

Рисунок 3.9 – Барабанна контактна сушарка

### Гребкова вакуум-сушка

**Призначення:** Даний апарат використовується для висушування чутливих до високих температур, а також токсичних та вибухонебезпечних речовин, для отримання висушених продуктів високої чистоти, а також в тих випадках, коли необхідна конденсація пари неводних розчинників, що видаляються з матеріалів (Рисунок 3.10).

**Принцип дії:** Гребкова сушарка складається з циліндричного корпусу 1 з паровою рубашкою 2 і мішалки 3. Гребки мішалки закріплені на валу взаємно перпендикулярно; на одній половині довжини барабану гребки мішалки зігнуті в одну сторону, на другій половині – в протилежну. Мішалка має реверсний привід, який автоматично змінює кожні 5-8 хв. напрям його обертання. Тому при роботі мішалки матеріал (завантажений через люк 4) періодично переміщається від периферії до середини барабану і в зворотному напрямку. Вал мішалки може бути пологим і через нього можна здійснювати нагрівання матеріалу, що висушується. Труби 5, що вільно перекочуються між гребками, сприяють руйнуванню грудок і додатково перемішують матеріал. Розвантаження висушеного матеріалу проводиться через люк 6. Корпус сушарки з'єднаний з поверхневим або барометричним конденсатором і вакуум-насосом.



- 1 – корпус сушарки; 2 – парова рубашка; 3 – мішалка;  
 4 – завантажувальний люк; 5 – труби, які сприяють перемішуванню матеріалу;  
 6 – розвантажувальний люк

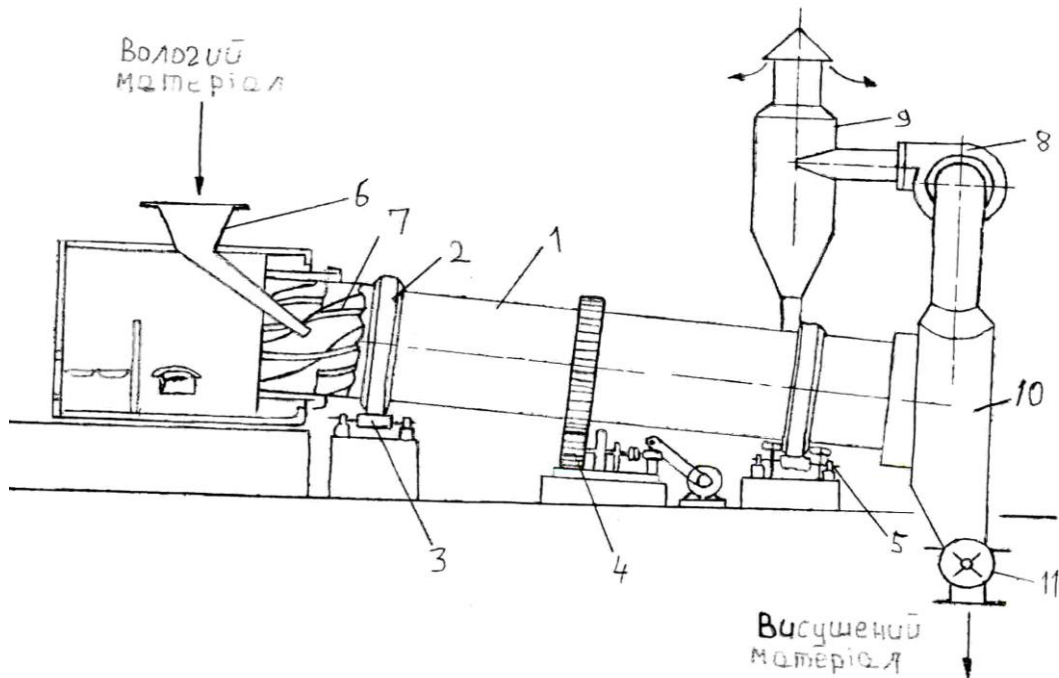
Рисунок 3.10 – Гребкова вакуум-сушка

**Переваги:** Збільшення швидкості сушіння за рахунок перемішування матеріалу, що повільно обертається горизонтальною мішалкою з гребками. Працюють автоматично.

**Недоліки:** Складність конструкції.

### 3. Опис і обґрунтування обраної конструкції

Барабанні сушарки використовуються для неперервного сушіння при атмосферному тиску шматкових, зернистих і сипучих матеріалів (мінеральних солей, хлоридів, фосфоритів та ін.) (Рисунок 3.1).



- 1 – барабан; 2 – бандажі; 3 – опорні ролики; 4 – зубчата передача;  
5 – опорно-упорні ролики; 6 – підживлювач; 7 – лопасті;  
8 – вентилятор; 9 – циклон; 10 – розвантажувальна камера;  
11 – розвантажний пристрій.

Рисунок 3.1 – Схема барабанної сушарки

Барабанна сушарка має циліндричний барабан, який встановлений з невеликим нахилом до горизонту ( $1/15$ — $1/50$ ) він опирається за допомогою бандажів 2 на ролики 3. Барабан починає рухатись за допомогою електродвигуна через зубчасту передачу 4 і редуктор. Число обертів барабану зазвичай не перевищує 5-8 об. у хв. Положення його в осьовому напрямку фіксується упорними роликами 5. Матеріал подається в барабан підживлювачем 6, перед цим підсушується, перемішуючись лопастями 7 приймально-гвинтової насадки, потім поступає на внутрішню насадку, яка розташована майже по всій довжині барабану. Насадка забезпечує рівномірний розподіл і добре перемішування матеріалу по перерізу барабану, а також його

тісний контакт при пересипанні з сушильним агентом – димовими газами.

Гази і матеріал особливо часто рухаються прямою, що не дозволяє перегріву матеріалу, так як в цьому випадку найбільш гарячі гази дотикаються до матеріалу, який має невелику вологість. Для того щоб не допустити виносу пилу з газами останні пропускаються через барабан вентилятором 8 з середньою швидкістю, яка не перевищує 2-3 м/с. Щоб уникнути посиленого виносу пилу з газами останні пропускаються через барабан вентилятором 8 з середньою швидкістю, що не перевищує 2—3 м/с. Перед викидом в атмосферу відпрацьовані гази очищуються від пилу в циклоні 9. На кінцях барабана часто встановлюють загущуючі пристрої (наприклад, лабіринтні), які затримують витік сушильного агенту.

У розвантажуючого кінця барабану є підпирний прилад у вигляді кільця або кільця, утвореного лопатками (у вигляді жалюзі). Призначення цього кільця – підтримувати установлену ступінь заповнення барабану матеріалом (не більше 20 %). Час перебування зазвичай регулюється швидкістю обертання барабану і рідше – зміною кута його нахилу. Висохлий матеріал виводиться із камери 10 через розвантажуючий пристрій 11, за допомогою якого герметизується камера 10. Підсоси повітря призвели б до марної витрати енергії, яку споживає вентилятор 8.

Вибір насадки залежить від розміру частинок і властивостей матеріалу, який висушується.

Підіймально – лопатева насадка використовується для сушки великих частинок, які здатні налипати, а секторна насадка – для мало сипучих і великих частинок матеріалу з великою густиною. Для маленьких розмірів частинок використовуються розподільчі насадки. Сушка дуже дрібних матеріалів здійснюється за допомогою перевалочної насадки з закритими комірками (Рисунок 3.1).

Типи насадок барабанних сушарок:

а – підіймально-лопатева;

б – секторна;

в,г – розподільна;

д – перевалочна

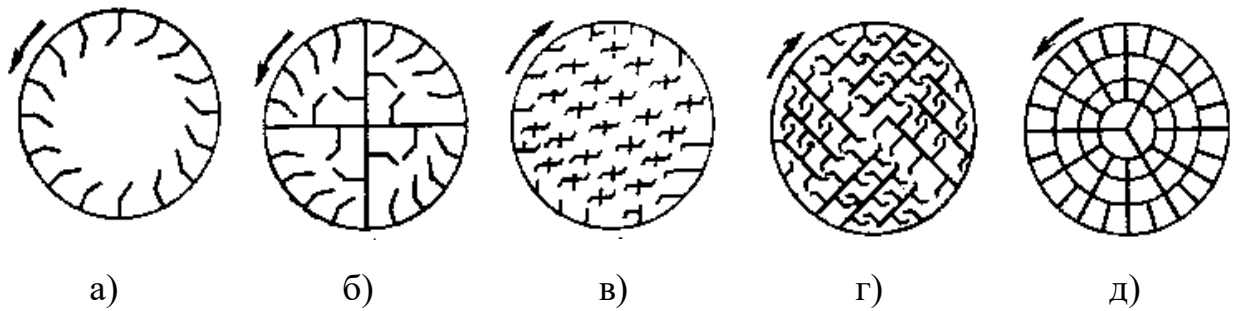


Рисунок 3.1 – Типи насадок барабанних сушарок:

а – підіймально-лопатева; б – секторна; в, г – розподільна; д – перевалочна

**Переваги :**

- 1) інтенсивна і рівномірна сушка внаслідок тісного контакту матеріалу і сушильного агенту .
- 2) компактність установки.

**Недоліки:**

Необхідність укомплектування енергомісткими приладами: циклоном, електродвигуном т. ін.

#### 4. Розрахунок основних параметрів барабанної сушарки

Розрахунок проводимо аналітичним шляхом по методиці приведені в [1].

Нехай температура повітря на вході в сушарку  $t_1 = 110^\circ\text{C}$ , а на виході  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт заповнення барабана  $\beta = 0,14\%$ .

Нехай для зимових умов середня температура  $t_0 = -2^\circ\text{C}$ , а відносна вологість  $\varphi_0 = 84\%$ . Припускаючи, що барометричний тиск в даній місцевості  $B = 762 \text{ мм.рт.ст. } (10360 \text{ кгс/м}^2)$ . Визначаємо аналітично  $b_0$  і  $I_0$ .

Вологовміст зовнішнього повітря:

$$d_0 = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_n}{B - \varphi \cdot p_n} = 622 \cdot \frac{0,84 \cdot 52,7}{10360 - 0,84 \cdot 52,7} = 2,669 \text{ г/кг} = 0,02669 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.пов.)}}$$

$$p_n = 52,7 \text{ кгс/м}^2$$

Тепловміст зовнішнього повітря:

$$I_0 = 0,24t_0 + (595 + 0,47t_0) \frac{d_0}{1000} = 0,24 \cdot (-2) + (595 - 0,47 \cdot 2) \frac{2,669}{1000} = 1,106 \text{ ккал/кг} = 4,63 \text{ кДж/кг}$$

Стан повітря на виході із калорифера характеризується параметрами

$$t_1 = 110^\circ\text{C}, d_0 = d_1 = 2,669 \text{ г/кг} = 0,02669 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.пов.)}}$$

$$I_1 = 0,24t_1 + (595 + 0,47t_1) \frac{d_1}{1000} = 0,24 \cdot 110 + (595 + 0,47 \cdot 110) \frac{2,669}{1000} = 27,99 \text{ ккал/кг} = 117,17 \text{ кДж/кг}$$

Параметри повітря на виході із сушарки: задаємось

$t_2 = 60^\circ\text{C}$  і  $\varphi_2 = 17\%$ . При  $60^\circ\text{C}$   $p_n = 2031 \text{ кгс/м}^2$ , тоді

$$d_2 = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_n}{B - \varphi \cdot p_n} = 622 \cdot \frac{0,17 \cdot 2031}{10360 - 0,17 \cdot 2031} = 21,44 \text{ г/кг} = 0,02144 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.пов.)}}$$

$$I_2 = 0,24t_2 + (595 + 0,47t_2) \frac{d_2}{1000} = 0,24 \cdot 60 + (595 + 0,47 \cdot 60) \frac{21,44}{1000} = 27,76 \text{ ккал/кг} = 116,2 \text{ кДж/кг}$$

Нехай для літніх умов  $t_0 = 21,4^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0 = 66\%$ .

Вологовміст зовнішнього повітря:

$$d_0 = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_n}{B - \varphi \cdot p_n} = 622 \cdot \frac{0,66 \cdot 28}{10360 - 0,66 \cdot 28} = 1,111 \text{ г/кг} = 0,0111 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.нов.)}}$$

$$p_n = 28 \text{ кгс/м}^2$$

Тепловміст зовнішнього повітря:

$$I_0 = 0,24t_0 + (595 + 0,47t_0) \frac{d_0}{1000} = 0,24 \cdot 21,4 + (595 + 0,47 \cdot 21,4) \frac{1,111}{1000} = 5,64 \text{ ккал/кг} = 23,61 \text{ кДж/кг}$$

Стан повітря на виході із калорифера характеризується параметрами:

$$t_1 = 110^\circ\text{C}, d_0 = d_1 = 1,111 \text{ г/кг} = 0,0111 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.нов.)}}$$

$$I_1 = 0,24t_1 + (595 + 0,47t_1) \frac{d_1}{1000} = 0,24 \cdot 110 + (595 + 0,47 \cdot 110) \frac{1,111}{1000} = 27,12 \text{ ккал/кг} = 113,52 \text{ кДж/кг}$$

$$p_n = 81 \text{ кгс/м}^2, \text{ тоді}$$

$$d_2 = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_n}{B - \varphi \cdot p_n} = 622 \cdot \frac{0,66 \cdot 81}{10360 - 0,66 \cdot 81} = 3,226 \text{ г/кг} = 0,03226 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.нов.)}}$$

$$I_2 = 0,24t_2 + (595 + 0,47t_2) \frac{d_2}{1000} = 0,24 \cdot 60 + (595 + 0,47 \cdot 60) \frac{3,226}{1000} = 27,76 \text{ ккал/кг} = 116,2 \text{ кДж/кг}$$

### Матеріальний баланс сушарки

Визначення кількості видаленої вологи за одиницю часу.

$$1 \text{ кг/с} = 3600 \text{ кг/год}$$

4.1.1 Кількість вологого матеріалу, який поступає на сушку:

$$G_1 = G_{\text{сyx}} \frac{100}{100 - \omega_1} = 3600 \cdot \frac{100}{100 - 4} = 3750 \text{ кг/год}$$

4.1.2 Кількість висушеного матеріалу:

$$G_2 = G_{\text{сyx}} \frac{100}{100 - \omega_2} = 3600 \cdot \frac{100}{100 - 0,3} = 3610,83 \text{ кг/год}$$

4.1.3 Кількість видаленої вологи:

$$W = G_1 - G_2 = 3750 - 3610,83 = 139,17 \text{ кг} / \text{год}$$

Кількість вологи, яка видалена в сушарці:

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = 3750 \cdot \frac{4 - 0,3}{100 - 0,3} = 139,168 \text{ кг} / \text{год}$$

### **Попередній вибір основних габаритних розмірів барабана**

Об'єм барабана:

Задаємося  $A_v = 6 \text{ кг} / (\text{м}^3 \cdot \text{год})$ ,  $D_6 = 1600 \text{ мм}$

$$V_6 = \frac{W}{A_v} = \frac{139,17}{6} = 23,2 \text{ м}^3$$

Довжина барабана:

$$L_6 = \frac{V_6}{0,785 \cdot D_6^2} = \frac{23,2}{0,785 \cdot 1,6^2} = 11,54 \text{ м}$$

Приймаємо  $L_6 = 11 \text{ м}$ ,  $\frac{L_6}{D_6} = \frac{11}{1,6} = 6,875$ ; Це допустимо, так як

$$3,5 < 6,875 < 7,0.$$

### **Розрахунок сушарки для літніх умов**

Питомі витрати сухого повітря на 1 кг вологи:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{0,0323 - 0,011} = 47,2 \text{ кг}$$

Годинні витрати повітря:

$$L = l \cdot W = 47,2 \cdot 139,17 = 6568,8 \text{ кг} / \text{год}$$

Об'єм повітря на вході в сушарку:

$$V_1 = v_1 L = 1,11 \cdot 6568,8 = 7291,37 \text{ м}^3 / \text{год}$$

де  $v_1 = 1,11 \text{ м}^3 / \text{год}$  - питомий об'єм вологого повітря при  $t_1 = 110^\circ \text{C}$ .

Об'єм повітря на виході із сушарки:

$$V_2 = v_2 L = 0,99 \cdot 6568,8 = 6503 \text{ м}^3 / \text{год}$$



де  $v_2 = 0,99 \text{ м}^3 / \text{год}$  - питомий об'єм вологого повітря при  $t_2 = 60^\circ\text{C}$  .

Витрати тепла на підігрів повітря в калорифері:

$$q_k = l(I_1 - I_0) = 47,2 \cdot (27,12 - 5,64) = 1013,86 \text{ ккал} = 4244,02 \text{ кДж}$$

Годинні витрати тепла:

$$Q_{\Gamma} = q_k W = 1013,86 \cdot 139,17 = 141098,34 \text{ ккал} / \text{год} = 590637,7 \text{ кДж} / \text{год}$$

### Розрахунок сушарки для зимових умов

Питомі витрати сухого повітря на 1 кг води:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{21,44 - 2,669} = 53,3 \text{ кг}$$

Годинні витрати повітря:

$$L = l \cdot W = 53,3 \cdot 139,17 = 7417,76 \text{ кг} / \text{год}$$

Об'єм повітря на вході в сушарку:

$$V_1 = v_1 L = 1,11 \cdot 7417,76 = 8233,7 \text{ м}^3 / \text{год}$$

де  $v_1 = 1,11 \text{ м}^3 / \text{год}$  - питомий об'єм вологого повітря при  $t_1 = 110^\circ\text{C}$  .

Об'єм повітря на виході із сушарки:

$$V_2 = v_2 L = 0,99 \cdot 7417,76 = 7343 \text{ м}^3 / \text{год}$$

де  $v_2 = 0,99 \text{ м}^3 / \text{год}$  - питомий об'єм вологого повітря при  $t_2 = 60^\circ\text{C}$  .

Витрати тепла на підігрів повітря в калорифері:

$$q_k = l(I_1 - I_0) = 53,3 \cdot (27,98 - 1,106) = 1432,38 \text{ ккал} = 5995,94 \text{ кДж}$$

Годинні витрати тепла:

$$Q_{\Gamma} = q_k W = 1432,38 \cdot 139,17 = 199344,91 \text{ ккал} / \text{год} = 834457,8 \text{ кДж} / \text{год}$$

### Втрати теплоти в навколишнє середовище для літніх умов

Середня швидкість повітря в сушарці:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{0,5 \cdot (V_1 + V_2)}{F_{\text{с}} \cdot (1 - \beta)} = \frac{0,5 \cdot (7291 + 6503)}{0,785 \cdot 1,6^2 (1 - 0,15 \cdot 3600)} = 1,098 \text{ м} / \text{с}$$

Середня температура

$$t_f = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{110 + 60}{2} = 85^{\circ} \text{C}$$

де  $\nu = 21,595 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  - кінематична в'язкість

$\lambda = 2,655 \cdot 10^{-2} \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^{\circ} \text{C}) = 3,088 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  - коефіцієнт теплопровідності

Для визначення режиму руху повітря знаходимо:

$$\text{Re} = \frac{\omega_{\text{в}} D_{\text{в}}}{\nu} = \frac{1,098 \cdot 1,6}{21,595 \cdot 10^{-6}} = 8,14 \cdot 10^4$$

Так як  $\text{Re} > 10^4$  то коефіцієнт тепловіддачі від повітря до стінки за рахунок вимушеної конвекції:

$$\text{Nu}_f = 0,018 \cdot (\text{Re})^{0,8} \cdot \varepsilon = 0,018 \cdot (8,14 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 1,16 = 177,1$$

$$\varepsilon = 1,16$$

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}_f \cdot \lambda}{D_{\text{в}}} = \frac{177,1 \cdot 2,655 \cdot 10^{-2}}{1,6} = 2,94 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^{\circ} \text{C}) = 3,42 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

### **Втрати теплоти в навколишнє середовище для зимових умов**

Середня швидкість повітря в сушарці:

$$\omega_{\text{в}}^{\text{ср}} = \frac{0,5 \cdot (V_1 + V_2)}{F_{\text{в}} \cdot (1 - \beta)} = \frac{0,5 \cdot (8234 + 7344)}{0,785 \cdot 1,6^2 (1 - 0,15 \cdot 3600)} = 1,26 \text{ м/с}$$

Середня температура

$$t_f = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{110 + 60}{2} = 85^{\circ} \text{C}$$

де  $\nu = 21,595 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  - кінематична в'язкість

$\lambda = 2,655 \cdot 10^{-2} \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^{\circ} \text{C}) = 3,088 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  - коефіцієнт теплопровідності

Для визначення режиму руху повітря знаходимо:

$$\text{Re} = \frac{\omega_{\text{в}} D_{\text{в}}}{\nu} = \frac{1,26 \cdot 1,6}{21,595 \cdot 10^{-6}} = 9,34 \cdot 10^4$$

Так як  $\text{Re} > 10^4$  то коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря за рахунок вимушеної конвекції може бути розрахований за рівнянням:

$$Nu_f = 0,018 \cdot (Re)^{0,8} \cdot \varepsilon = 0,018 \cdot (9,34 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 1,16 = 197,7$$

$$\varepsilon = 1,16$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_f \cdot \lambda}{D_6} = \frac{197,7 \cdot 2,655 \cdot 10^{-2}}{1,6} = 3,28 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) = 3,815 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі за рахунок звичайної конвекції:

$$Nu_f = 0,47 \cdot (Cr)^{0,25} = 0,47 \cdot (2 \cdot 10^{10})^{0,25} = 176,75$$

Критерій Грасгофа:

$$Cr = \frac{g \cdot D_6^3}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta t}{T} = \frac{9,81 \cdot 1,6^3 \cdot 85}{(21,595 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 358} = 2 \cdot 10^{10}$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_1'' = \frac{176,75 \cdot 2,655 \cdot 10^{-2}}{1,6} = 2,93 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) = 3,408 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

Коефіцієнт тепловіддачі від повітря до стінки:

$$\alpha_1 = 1,25 \cdot (\alpha_1'' + \alpha_1') = 1,25 \cdot (2,93 + 2,94) = 7,34 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) = 8,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

Припускаємо, що температура в цеху -  $t_y = 15^\circ \text{C}$ , а температура ізолюваної зовнішньої стінки барабана -  $t_{w^2} = 30^\circ \text{C}$

Середня температура пограничного шару повітря біля стінки:

$$t_{n.шар.} = \frac{30 + 15}{2} = 22^\circ \text{C}$$

при цих умовах

$$\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$$

$$\lambda = 2,25 \cdot 10^{-2} \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) = 2,617 \cdot 10^{-2} /(\text{м} \cdot \text{K})$$

Критерій Грасгофа:

$$Cr = \frac{9,81 \cdot 1,7^3 \cdot 15}{(1,51 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 288} = 107 \cdot 10^8$$

Приймаємо із урахуванням товщини стінки і шару ізоляції:

$$D_n = 1,7 \text{ м}$$

Тоді

$$(Cr \cdot Pr) = (107 \cdot 10^8 \cdot 0,7) = 75 \cdot 10^8 > 2 \cdot 10^6$$

Знаходимо критерій Нусельта:

$$Nu_T = 0,135 \cdot \sqrt[3]{Cr \cdot Pr} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{75 \cdot 10^8} = 263$$

Тоді

$$\alpha'_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_H} = \frac{263 \cdot 2,25 \cdot 10^{-2}}{1,7} = 3,48 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) = 4,047 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Променевий коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha''_2 = \frac{\varepsilon_n \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cp}}{100} \right)^4 \right]}{T_{cm} - T_{cp}} = \frac{0,95 \cdot 4,96 \left[ \left( \frac{273 + 30}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + 15}{100} \right)^4 \right]}{30 - 15} =$$

$$= 4,76 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) = 5,536 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Тут  $\varepsilon_n = 0,95$  - ступінь чорноти для поверхні;

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки барабана до повітря:

$$\alpha_2 = \alpha'_2 + \alpha''_2 = 3,48 + 4,76 = 8,24 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) = 9,583 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Питомий тепловий потік:

$$q_l = \pi \cdot D_\delta \cdot \alpha_1 \cdot (t_f - t_{w_1}) = 3,14 \cdot 1,6 \cdot 7,36 \cdot (85 - 60) = 924,42 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) =$$

$$= 1075,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$t_{w_1} = 60^\circ \text{C}$$

Загальний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{(\delta_1 + \delta_3)}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{7,36} + \frac{1}{8,24} + \frac{(0,01 + 0,001)}{39} + \frac{0,03}{0,095}} = 1,74 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ \text{C}) =$$

$$= 2,024 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Площа поверхні теплообміну:

$$F = \pi \cdot D_H \cdot L_\delta + 2 \cdot 0,785 \cdot D_H^2 = 3,14 \cdot 1,6 \cdot 11 + 2 \cdot 0,785 \cdot 1,6^2 = 59,28 \text{ м}^2$$

Втрати тепла в навколишнє середовище на 1 кг вологи:

$$q_n = \frac{K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}}{W} = \frac{1,74 \cdot 59,28 \cdot 85}{139,17} = 63 \text{ ккал} = 263,72 \text{ кДж}$$

Тепловий баланс сушарки

для літніх умов

Прихід тепла в ккал на 1 кг вологи:

1) з повітрям  $q = l \cdot I_0 = 47,2 \cdot 5,64 = 266,21 \text{ ккал} = 1114,36 \text{ кДж}$

2) з вологістю матеріала  $q = 1 \cdot \theta_1 = 30 \text{ ккал} = 125,6 \text{ кДж}$

3) з матеріалом

$$q = \frac{G_2}{W} \cdot c_m'' \cdot \theta_1 = \frac{3610,83}{139,17} \cdot 0,23 \cdot 30 = 179 \text{ ккал} = 749,3 \text{ кДж}$$

Де теплоємність на виході із сушарки визначена по такій формулі:

$$c_m'' = 0,23 \cdot \frac{100 - 0,1}{100} + \frac{0,1}{100} = 0,23 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{C} = 0,963 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

4) від створювача тепла  $q_k = 1013,86 \text{ ккал} = 4244,02 \text{ кДж}$

Сума:  $1489,1 \text{ ккал/кг} = 6234,21 \text{ кДж/кг}$

Витрати теплоти в ккал на 1 кг вологи:

1) з повітрям  $q = l \cdot l_2 = 47,2 \cdot 27,76 = 1310,27 \text{ ккал} = 5484,8 \text{ кДж}$

2) з матеріалом  $q_m = \frac{3610,83}{139,17} \cdot 0,23 \cdot 30 = 179 \text{ ккал} = 749,3 \text{ кДж}$

Витрати в навколишнє середовище  $q_{вт} = 65,89 \text{ ккал} = 275,82 \text{ кДж}$

Сума:  $1555,2 \text{ ккал/кг} = 6510,067 \text{ кДж/кг}$

для зимових умов

Прихід тепла в ккал на 1 кг вологи:

1) з повітрям  $q = l \cdot I_0 = 53,3 \cdot 1,106 = 58,95 \text{ ккал} = 246,76 \text{ кДж}$

2) з вологістю матеріала  $q = 1 \cdot \theta_1 = 20 \text{ ккал} = 83,72 \text{ кДж}$

3) з матеріалом

$$q = \frac{G_2}{W} \cdot c_m'' \cdot \theta_1 = \frac{3610,83}{139,17} \cdot 0,23 \cdot 20 = 119,35 \text{ ккал} = 499,6 \text{ кДж}$$

Де теплоємність на виході із сушарки визначена по такій формулі:

$$c_m'' = 0,23 \cdot \frac{100 - 0,1}{100} + \frac{0,1}{100} = 0,23 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{C} = 0,963 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

від створювача тепла  $q_k = 1432,38 \text{ ккал} = 5995,94 \text{ кДж}$

Сума:  $1630,91 \text{ ккал/кг} = 6826,99 \text{ кДж/кг}$

Витрати теплоти в ккал на 1 кг вологи:

1) з повітрям  $q = 53,3 \cdot 27,76 = 1479,61 \text{ ккал} = 6193,65 \text{ кДж}$

2) з матеріалом  $q_m = \frac{3610,83}{139,17} \cdot 0,23 \cdot 20 = 119,35 \text{ ккал} = 499,6 \text{ кДж}$

3) Витрати в навколишнє середовище  $q_{em} = 65,89 \text{ ккал} = 275,82 \text{ кДж}$

Сума:  $1664,85 \text{ ккал/кг} = 6969,06 \text{ кДж/кг}$

### Визначення тривалості сушіння

Час сушки нітрату амонію можна розрахувати по формулі:

$$\tau = 120 \cdot \frac{\beta \cdot \rho \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{A_v \cdot [200 - (\omega_1 + \omega_2)]} = 120 \cdot \frac{0,14 \cdot 800 \cdot (4 - 0,3)}{7 \cdot [200 - (4 + 0,3)]} = 36,3 \text{ хв}$$

де  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$  - насипна маса матеріала

Перевіряємо розрахунок часу сушіння:

$$V_{\phi} = 0,785 \cdot D_{\phi}^2 \cdot L_{\phi} = 0,785 \cdot 1,6^2 \cdot 11,54 = 23,2 \text{ м}^3$$

Хвилинна об'ємна подача матеріала:

$$V = \frac{G_1}{60 \cdot \rho} = \frac{3750}{60 \cdot 800} = 0,07813 \text{ м}^3 / \text{хв}$$

Час сушіння:

$$\tau = \frac{V_{\phi} \cdot \beta}{V} = \frac{23,2 \cdot 0,14}{0,07813} = 41,57 \text{ хв}$$

### Висновок:

По заданих умовах розраховано процес конвективного сушіння нітрату амонію в барабанній сушарці за наступних умов.

Для зимових умов за  $t_2 = 60^\circ\text{C}$  і  $\varphi_2 = 17\%$ , ми отримаємо такі результати:

$d_0 = 0,02669 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.пов.)}}$	- вологовміст зовнішнього повітря
$d_2 = 0,2144 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.пов.)}}$	- вологовміст повітря на виході із сушарки
$I_2 = 116,2 \text{ кДж / кг}$	- тепловміст зовнішнього повітря
$L = 7417,76 \text{ кг / год}$	- годинні витрати повітря
$V_1 = 8233,7 \text{ м}^3 / \text{год}$	- об'єм повітря на вході в сушарку
$V_2 = 7343 \text{ м}^3 / \text{год}$	- об'єм повітря на виході з сушарки
$q_k = 5995,94 \text{ кДж}$	- витрати тепла на підігрів повітря в калорифері
$Q_r = 199344,91 \text{ кДж / год}$	- годинні витрати тепла

Для літніх умов за  $t_0 = 21,4^\circ\text{C}$  і  $\varphi_0 = 66\%$ , початкової температури матеріала  $\theta = 30^\circ\text{C}$  і температури повітря в цеху  $t_y = 25^\circ\text{C}$  ми отримаємо такі результати:

$d_0 = 0,0111 \frac{\text{кг(вологи)}}{\text{кг(абс.сух.пов.)}}$	- вологовміст зовнішнього повітря
$I_0 = 23,61 \text{ кДж / кг}$	- тепловміст зовнішнього повітря
$I_1 = 113,52 \text{ кДж / кг}$	- тепловміст повітря на виході із калорифера
$L = 6568,8 \text{ кг / год}$	- годинні витрати повітря
$V_1 = 7291,37 \text{ м}^3 / \text{год}$	- об'єм повітря на вході в сушарку
$V_2 = 6503 \text{ м}^3 / \text{год}$	- об'єм повітря на виході з сушарки
$q_k = 4244,02 \text{ кДж}$	- витрати тепла на підігрів повітря в калорифері
$Q_r = 590637,7 \text{ кДж / год}$	- годинні витрати тепла

Матеріальний баланс сушарки:

$G_1 = 3750 \text{ кг} / \text{год}$  - кількість вологого матеріала, який поступає в сушарку

$G_2 = 3610,83 \text{ кг} / \text{год}$  - кількість висушеного матеріала

$W = 139,17 \text{ кг} / \text{год}$  - кількість видаленої води

Вибрані такі габарити барабанної сушарки:

$V_6 = 23,2 \text{ м}^3$  - об'єм барабана

$L_6 = 12 \text{ м}$  - довжина барабана

$A_v = 6 \text{ кг} / (\text{м}^3 \cdot \text{год})$  - напруга барабана по вологості

$D_6 = 1600 \text{ мм}$  - діаметр барабана

Ці параметри відповідають сушарці БН1,6-12НУ-01\*, яка зображена на рис.6.1

Отримана неув'язка теплового балансу для зимніх умов склала 142,073 кДж/кг води, що складає 2,04%, а для літніх умов склала 276,7 кДж/кг води, що складає 4,25%.

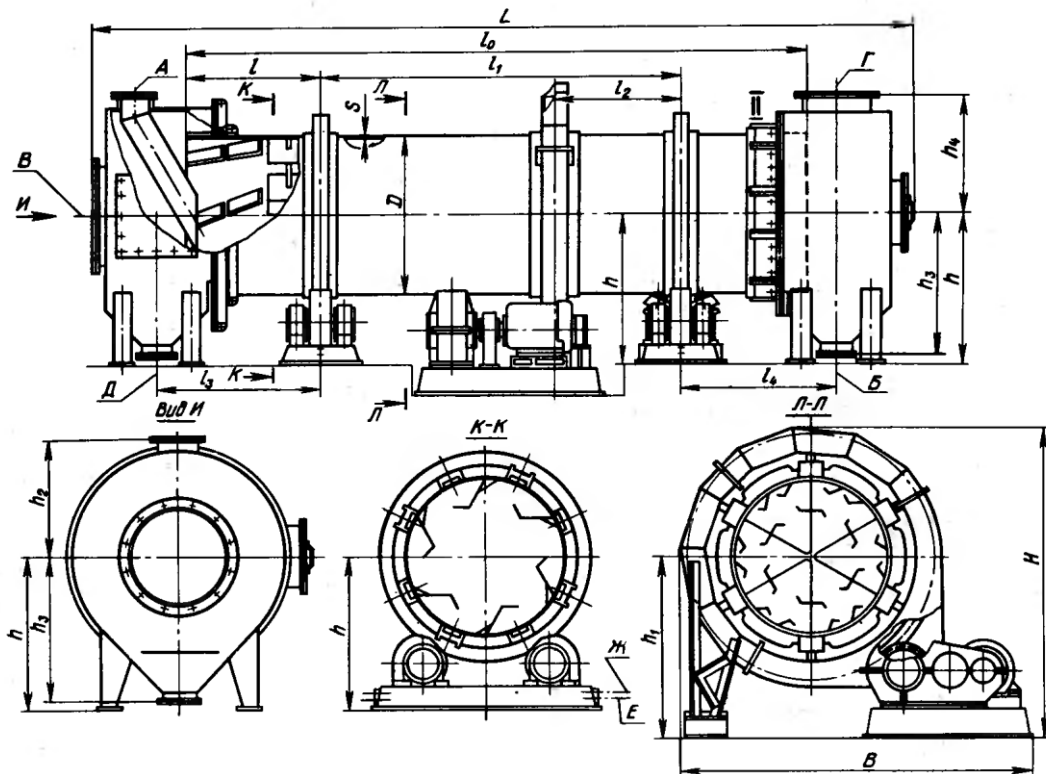


Рисунок 6.1 – Барабанна сушарка типу БН діаметром 1600 мм.



### Технічна характеристика

Умовне позначення сушарки	Індекс ОКН	Діаметр і довжина барабана, мм		Част ота жніст ь елект родв игуна , кВт	Поту жніст ь елект родв игуна , кВт	Габаритні розміри, мм			Маса , кг
		D	Іо			Довж ина L	Шир ина В	Висо та Н	
БН1,6-12НУ- 01*	36 1331 1085	1600 0	1200 0	0,053	13,2	1348 0	2860	3255	1689 5

D	I <sub>0</sub>	I	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	h	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	S
мм												
160 0	1200 0	250 0	7000	110 0	272 5	275 0	145 3	177 0	110 0	1320	1080	8

### Таблиця штуцерів

Позначення	Призначення	Діаметр барабана D,мм	Умовний прохід, мм	Кількість
А	Вхід продукта	1600	325	1
Б	Вихід продукта		300*300	
В	Вхід теплоносія		1050	
Г	Вихід теплоносія		550	
Д	Вихід залишків продукта		300*300	
Е	Вхід води		25	4
Ж	Вихід води		25	

## 5. Список використаної літератури

1. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов/Под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. - Л.: Химия, 1987. – 576 с.
2. Машины и аппараты химических производств. Под ред. д-ра техн. наук, проф. И. И. Чернобыльского. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1974, 456 с. Авт.: И. И. Чернобыльский, А. Г. Бондарь, Б. А. Гаевский, С. А. Городинская, Р.Я. Ладиев, Ю.М. Тананайко, В.Т. Миргородский.
3. Метод.вказівки до проведення НДРС з курсу «Процеси та апарати хімічних та нафто-переробних виробництв» для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх форм навчання /Укл. І.А. Андреев – К.: КПІ, 2008. – 18 с.
4. «Сушильные аппараты и установки. Каталог» / А. А. Корягин, В. Г. Восконянц, В. П. Осинский, В. В. Мамистов, Э. Л. Ламм, Б. Г. Езерницкий, В. В. Токарёв, Л. Ф. Соколовская. / издание пятое, исправленное и дополненное / издательство «ЦЕНТИХИМНЕФТЕМАШ» Москва, 1988. – 73 с.